



Titre: Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec
recirculation des boues chimiques

Auteur: Frédéric Monette
Author:

Date: 1999

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Monette, F. (1999). Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec
recirculation des boues chimiques [Thèse de doctorat, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8895/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8895/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**TRAITEMENT DES EAUX USÉES PAR
COAGULATION-FLOCULATION AVEC
RECIRCULATION DES BOUES CHIMIQUES**

FRÉDÉRIC MONETTE

**DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)**

(GÉNIE CIVIL)

AVRIL 1999



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-42826-5

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

**TRAITEMENT DES EAUX USÉES PAR
COAGULATION-FLOCCULATION AVEC
RECIRCULATION DES BOUES CHIMIQUES**

Présentée par : **MONETTE Frédéric**

en vue de l'obtention du diplôme de : **Philosophiae Doctor**

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. **DESIARDINS Raymond**, M.Eng., président

M. **BRIÈRE François G.**, M.E., membre et directeur de recherche

M. **DELISLE Claude**, Ph.D., membre

M^{me} **ROY Nicole A.**, Ph.D., membre

À mes enfants...

...et à leur maman.

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, Monsieur François G. Brière, pour son éternelle confiance, son aide continuelle et son précieux temps aux moments les plus opportuns. Je ne le remercierai probablement jamais assez. Je dois également toute ma gratitude à Monsieur Robert Hausler, codirecteur, pour m'avoir transmis son enthousiasme pour la science. Il a su me faire découvrir toutes mes qualités de chercheur et d'entrepreneurship. Son influence sera, à long terme, toujours bénéfique.

Ma reconnaissance va également au ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF), par le biais du Fonds de recherche et de développement technologique en environnement, pour son support financier. Ce doctorat émerge directement d'une étude, commandée par le MEF, et réalisée sous ma supervision à la STEPPE-UQAM. Des remerciements doivent être exprimés envers le personnel du *Centre d'épuration Rive-Sud* pour leur étroite collaboration tout au long de ce projet. De même, je dois toute ma gratitude à Michel Létourneau et Kathleen Pouliot du *Groupe-conseils Génivar inc.*, partenaire lors de la réalisation de ce mandat. Finalement, des remerciements doivent être adressés au Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) ainsi qu'au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) pour le soutien financier apporté lors de mes travaux de doctorat.

Par ailleurs, je tiens à remercier de manière particulière le personnel de la *STEPPE•UQAM* pour leur participation directe ou indirecte au projet. Je pense à Marc Duchesne, collaborateur essentiel au projet et ami pour toujours, à Cyril Barbarit, pour son aide précieuse à la partie analytique, à Maria Cendan, pour son soutien inlassable et apprécié à toutes mes activités de recherche, à Serge Poitras, pour son dévouement toujours surprenant malgré les enfants, à Catherine Goyer pour son aide spontanée et toujours cordiale et à Mathias Glaus pour son implication parfaitement synchronisée avec mes absences du travail.

Des remerciements spéciaux à tous les employés et étudiants, de passage à la *STEPPE•UQAM*, qui ont contribué à la réalisation de ce doctorat.

Je dois également remercier tous mes ami(e)s qui ont toujours su comprendre la situation de «double emploi» à laquelle j'ai été confronté durant plusieurs années. Je me réjouis déjà à la pensée de leur accorder un peu plus de temps.

De plus, je ne peux m'empêcher de faire l'éloge de mes parents et de ma famille pour m'avoir donné, dès mon jeune âge, le bagage nécessaire à mon plein développement. Leur soutien, que je qualifierais de «silencieux», a été également fortement apprécié. Ils ont d'ailleurs toujours su que j'avais la capacité et la ténacité nécessaires pour compléter ce grand projet. Il fallait quand même que je me le démontre avant tout.

Enfin, je ne pourrais terminer autrement cette section sans mettre en évidence le soutien inlassable et inconditionnel de ma compagne au cours de ces longues années. **Marie**, je t'offre tout mon amour et ma présence auprès de notre premier enfant.

RÉSUMÉ

Le procédé de coagulation-floculation est couramment employé en épuration des eaux usées pour limiter le rejet de certains polluants, tels que le phosphore total et les MES, au cours d'eau récepteur. Dans le but de réduire la quantité et le coût des produits chimiques nécessaires au traitement, la recirculation des boues chimiques produites (flocs préformés) au processus de coagulation-floculation pourrait être envisagée. En effet, cette recirculation permettrait d'exploiter à la fois le pouvoir coagulant résiduel de la boue et sa capacité d'adsorption, tout en fournissant une concentration élevée de noyaux initiateurs de coagulation. De plus, elle favoriserait une amélioration des rendements associés au processus de coagulation-floculation. Plusieurs expériences de recirculation ont déjà été réalisées par le passé, mais elles ont généralement impliqué la recirculation (ou la réutilisation) des boues d'eau potable. Cette problématique a conduit à la présente étude portant sur la recirculation de boues chimiques issues d'un processus d'épuration d'eaux usées urbaines par coagulation-floculation.

Cette étude se propose d'évaluer les performances d'un procédé de traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques, et ce, en comparaison avec un système classique (sans recirculation). La réalisation de cette étude vise également à préciser l'influence de chacun des réactifs sur le processus de coagulation-floculation, à étudier la stabilité d'un tel procédé et à comprendre ses mécanismes de mise en oeuvre et de contrôle, jusqu'à un niveau d'application à grande échelle. De plus, l'effet de la recirculation sur les caractéristiques des boues produites et sur leur conditionnement y est examiné. Par ailleurs, cette étude permettra d'approfondir les connaissances relatives aux mécanismes de coagulation-floculation mis en jeu lorsqu'une boue est recirculée.

Pour atteindre les objectifs fixés, trois phases d'essais ont été réalisées à trois échelles différentes : laboratoire (bêchers), pilote (réacteur de coagulation-floculation de 100 litres)

et grande échelle (*Centre d'épuration Rive-Sud*). La première phase de travaux, menée à l'échelle pilote, a porté sur l'évaluation de la performance générale et la stabilité du procédé de recirculation. La seconde phase, conduite en laboratoire et à l'échelle pilote, s'est intéressée à l'étude spécifique de l'influence des réactifs sur le procédé. Finalement, la troisième phase a permis une évaluation du procédé à grande échelle et une validation des résultats obtenus lors des deux phases précédentes. Lors de ces derniers essais, l'évolution de la qualité des eaux traitées dans deux filières parallèles alimentées simultanément par une même eau brute, dont l'une intégrait la recirculation, a été suivie.

Les essais réalisés en laboratoire et à l'échelle pilote ont permis de conclure que la boue recirculée participait favorablement au processus de traitement par coagulation-floculation. Les gains de rendement s'observent plus particulièrement pour de faibles concentrations de coagulant et lorsque celle de l'adjuvant de floculation n'est pas limitative. Les meilleures performances sont obtenues lorsque la boue est introduite avant le coagulant et l'adjuvant de floculation. Des résultats tout à fait opposés ont été obtenus à grande échelle. En effet, la recirculation a contribué à une dégradation significative de la qualité de l'eau par rapport à un procédé classique. Les difficultés de traitement s'expliquent essentiellement par des infrastructures inadéquates à cette station pour intégrer la recirculation. La forte concentration de coagulant employée a également limité les gains de rendements associés à la recirculation. Compte tenu des résultats obtenus, la recirculation de boues ne peut être envisagée au *Centre d'épuration Rive-Sud*.

Par ailleurs, les essais à l'échelle pilote n'ont pas révélé de problèmes particuliers de stabilité du procédé. Seule une dispersion inadéquate de la boue, avant sa mise en contact avec l'adjuvant de floculation, aurait affecté sa stabilité. À grande échelle, le procédé a montré certains signes évidents de déséquilibres de fonctionnement (instabilités). Cette situation est attribuable aux équipements en place qui n'offraient pas un niveau de contrôle suffisant du flux massique de boues recirculées. Par ailleurs, la recirculation de boues n'a pas permis

d'absorber davantage les variations de la charge (phosphore total, MES, etc.) de l'eau brute. Le procédé se comporte comme une coagulation floculation classique en réagissant instantanément à des modifications de charges de l'eau brute et de concentrations de réactifs, en plus de répondre rapidement à toute modification du flux de solides recirculés. L'âge de la boue n'a également pas constitué un paramètre critique lorsque la boue est recirculée assez rapidement après sa formation (quelques heures).

Les mécanismes prédominants de coagulation-floculation identifiés, responsables des gains de rendements par rapport à un système classique de coagulation-floculation, sont le balayage («*sweep flocculation*») et l'entrappage («*enmeshment*»). Le taux de «captage» d'impuretés par la boue, bien qu'il augmente avec le taux de recirculation, serait réversible et assujéti à la concentration de coagulant injectée. Ce «captage» est fortement lié à la qualité des pontages obtenus à l'étape de floculation et, par le fait même, à la concentration d'adjuvant de floculation employée. À cet effet, pour bénéficier de meilleurs rendements par rapport à un système classique, les besoins en adjuvant de floculation devront être parfaitement comblés. Toute déficience mènera à une dégradation de la qualité de l'eau traitée.

Compte tenu de l'ensemble des résultats obtenus, la boue peut être considérée comme un réactif au même titre que le coagulant ou l'adjuvant de floculation, qui possède une capacité de traitement. Les bienfaits de ce réactif seraient cependant nettement plus physiques que chimiques. Les résultats obtenus en laboratoire et à l'échelle pilote laissent entrevoir, pour l'instant, des économies de près de 10% associés à l'achat de réactifs chimiques, si le taux de recirculation est ajusté entre 300 et 400 mg-MES/L.

La mesure de la turbidité des eaux du flocculateur constituerait un excellent outil indicateur pour évaluer, en temps réel, le taux de recirculation (en mg-MES/L). Lors des essais à grande échelle, une excellente corrélation a été obtenue entre la concentration de MES et

la turbidité. Par ailleurs, la siccité de la boue issue d'une recirculation est plus élevée que celle des boues classiques. La concentration plus importante d'adjuvant de floculation injectée et la compression exercée par le lit de boues expliqueraient ce résultat. À siccité égale, la résistance spécifique des boues recirculées semble assez comparable à celle d'une boue issue d'une coagulation-floculation classique. Toutefois, en raison de la siccité plus élevée des boues recirculées, la résistance spécifique et les concentrations du conditionneur de boues seront plus grandes.

Cette étude a permis d'augmenter de manière importante le niveau des connaissances scientifiques et techniques associées à la recirculation de boues chimiques urbaines. Entre autres, l'étude a abordé les notions liées à la stabilité du procédé, à l'influence individuelle des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation, boue) sur le processus de coagulation-floculation, aux impacts de la recirculation sur les caractéristiques des boues résultantes, ainsi qu'aux mécanismes de contrôle du procédé. Les essais à grande échelle constituaient aussi une première expérience comparative simultanée, en régime dynamique, de deux filières de traitement d'une station réelle alimentées avec une même eau usée, dont l'une intègre la recirculation. De plus, un premier outil indicateur de fonctionnement du procédé a pu être développé.

Plusieurs aspects n'ont pas été abordés lors de cette étude. Ils concernent, entre autres, l'étude de concentrations plus élevées de boues recirculées, l'optimisation de l'intensité de mélange lors de l'injection des réactifs, la détermination d'un ratio «adjuvant de floculation : boue», le développement d'un équipement de recirculation (système de pompage) adapté aux besoins, le contrôle du flux massique de boues recirculées et, dans une perspective plus théorique, l'étude des vitesses de chute des floes et de leur résistance au cisaillement. Les recherches futures conduiront nécessairement, à long terme, à une amélioration des performances du procédé de coagulation-floculation.

ABSTRACT

The coagulation-flocculation process is commonly used in wastewater treatment to limit the disposal of pollutants such as total phosphorous and suspended solids. The quantities and costs of chemicals required by the treatment process may be reduced by integrating chemical sludge recycling to the classical coagulation-flocculation process. Recycling sludge should profit residual coagulant and adsorption capacities while providing seed for floc nucleation (coagulation). Furthermore, recycling sludge should enhance coagulation-flocculation process results. Although some experimentations have been carried out in the past, most projects involved recycling (or reusing) drinking water sludge. Few have focused on recycling chemical sludge in a wastewater treatment process.

The purpose of this study is to evaluate the performance of a coagulation-flocculation process incorporating chemical sludge recycling, in comparison with a classical process (without recycling). Other project objectives consist in examining the functions of the reagents involved in a coagulation-flocculation process, studying the stability of the process and understanding its operational and control mechanisms, in a context of a full-scale application. The effects of the recycling process on sludge characteristics and conditioning are also examined. This study will also provide a better understanding on the coagulation and flocculation mechanisms involved in recycling sludge applications.

The study consisted in three different phases carried out at three levels of application: laboratory (jar-tests), pilot (100-liter pilot reactors) and full-scale (*Centre d'épuration Rive-Sud*). The first phase of the study, carried out at pilot level, consisted in gaining a better understanding on the stability and efficiency of the coagulation-flocculation process integrating chemical sludge recycling. The second phase, carried out at laboratory and pilot levels, sought to examine the functions of the reagents involved in coagulation-flocculation process. As for the third phase, its purpose was to evaluate the performances of sludge

recycling at a full-scale level and validate the results obtained during the first and second phase. During the third phase, tests consisted in following the evolution of the quality of the treated water when two flowsheets were supplied with the same wastewater, one flowsheet incorporating the sludge recycling process.

Tests carried out at laboratory and pilot levels showed that the recycled sludge participates favorably in the coagulation-flocculation process. The gains in efficiency are particularly significant for lower coagulant concentrations and when flocculant concentration is not limitative. Better results are obtained when adding sludge before coagulant and flocculant injections. At a full-scale level, however, results showed that the recycled sludge contributes significantly to water degradation compared to a classical coagulation-flocculation system. The problems encountered were mainly caused by inadequate plant installations. High coagulant concentrations also limited the gains in efficiency associated with sludge recycling. Given these results, sludge recycling is not recommended at the *Centre d'épuration Rive-Sud*.

Pilot level testing did not identify any particular stability problems. However, cases of inadequate sludge dispersion prior to flocculant addition might cause some process instability. At a full-scale level, the process did show clear signs of instability. This situation is explained by the fact that plant equipment did not permit adequate control of sludge recycling loads. Moreover, sludge recycling did not absorb wastewater load variations. Tests also showed that the process reacts immediately as does a classical coagulation-flocculation system to wastewater loading and reagent modifications, as well as to any changes in sludge recycling loads. When sludge is recycled rapidly (few hours), its age is not a critical parameter in the process.

The predominant coagulation-flocculation mechanisms that explain the increase in efficiency, in comparison with a classical process, are sweep flocculation and enmeshment. Although

the “entrapment” rate of pollutants (by the sludge) increases with the sludge recycling load, it appears reversible and seems to vary according to coagulant concentrations. The “entrapment” rate depends heavily on the quality of the bridging obtained during flocculation, and inevitably on flocculant concentration. To insure efficiency gains, flocculant concentrations must be adequately adjusted, otherwise the water quality will be altered.

Given these results, sludge may be considered as a reagent with treatment capacities, as are coagulants and flocculants. However, its benefits are more physical than chemical. Results obtained at laboratory and pilot levels show that if the recycling rate is maintained between 300 and 400 mg-SS/L, the cost of chemicals is reduced by almost 10%.

Turbidity measurements of the flocculated water can be used as an accurate real-time indicator for sludge recycling load estimation (mg-SS/L). During full-scale testing, an excellent correlation was obtained between suspended solids and turbidity. The recycled sludge solids content obtained was higher in comparison with that of a classical process. The high concentration of flocculants injected and the sludge compression effect explain such results. When sludge solids content is equivalent, the specific resistance of the recycled sludge is quite similar to the sludge produced in a classical process. However, given the higher solids content of the recycled sludge, the specific resistance and conditioning agent concentrations will be greater.

This study has provided a greater scientific and technical understanding of chemical sludge recycling. It examined the stability of the process, the individual influence of all reagents involved (coagulants, flocculants, sludge), the impact of recycling on sludge characteristics, as well as the mechanisms that control the process. The full-scale trials consisted in a first comparative study of two flowsheets supplied simultaneously in parallel with the same wastewater, one flowsheet incorporating the sludge recycling process. Furthermore, the

first process indicator was developed.

Many aspects were not covered by this project. They involve the study of sludge recycling at higher concentrations, the optimization of mixing intensities when reagents are injected, the determination of a "flocculant:sludge" ratio, the design of equipment adapted for sludge recycling (pumping system), the control of sludge recycling loads, and in a more fundamental perspective, the study of floc settling velocity and shear rate resistance. The research possibilities are numerous and diverse, and each new step taken into that direction will eventually contribute to improve the performances of the coagulation-flocculation process.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT	xi
TABLE DES MATIÈRES	xv
LISTE DES TABLEAUX	xviii
LISTE DES FIGURES	xix
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xx
LISTE DES ANNEXES	xxi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 GÉNÉRALITÉS	1
1.2 CONTEXTE GÉNÉRAL	3
1.3 REVUE DE LA DOCUMENTATION SCIENTIFIQUE	4
1.3.1 Mécanismes impliqués	4
1.3.2 Expériences de recirculation en laboratoire et à l'échelle pilote	7
1.3.3 Expériences de recirculation à grande échelle	10

1.4 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	13
1.4.1 Problématique	13
1.4.2 Objectifs généraux	15
1.4.3 Objectifs spécifiques	17
 CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	 21
2.2 EAUX USÉES ET RÉACTIFS EMPLOYÉS	21
2.3 ÉQUIPEMENTS	22
2.3.1 Essais en laboratoire	22
2.3.2 Essais à l'échelle pilote	22
2.3.3 Essais à grande échelle	23
2.4 PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX	24
2.4.1 Phase 1 : Performance générale et stabilité du procédé	24
2.4.2 Phase 2 : Influence des réactifs	25
2.4.3 Phase 3 : Évaluation et validation à grande échelle	27
2.5 MÉTHODES ANALYTIQUES	30
 CHAPITRE 3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS	 31
3.1 PHASE 1 : PERFORMANCE GÉNÉRALE ET STABILITÉ DU PROCÉDÉ	31
3.2 PHASE 2 : INFLUENCE DES RÉACTIFS	33
3.3 PHASE 3 : ÉVALUATION ET VALIDATION À GRANDE ÉCHELLE	36
 CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE	 40
4.1 BESOINS EN ADJUVANT DE FLOCCULATION	41
4.2 STABILITÉ ET CONTRÔLE DU PROCÉDÉ	42
4.3 LIEU D'INTRODUCTION DE LA BOUE AU PROCÉDÉ	44
4.4 BOUES GÉNÉRÉES PAR RECIRCULATION	45

4.5 RECIRCULATION DE BOUES FERRIQUES	47
4.6 PERFORMANCES GÉNÉRALES DU PROCÉDÉ DE RECIRCULATION	48
4.7 MÉCANISMES DE COAGULATION-FLOCULATION	51
4.8 ASPECTS ÉCONOMIQUES	58
 CHAPITRE 5 CONCLUSION GÉNÉRALE	 60
 RÉFÉRENCES	 68
 ANNEXES	 73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Causes des difficultés de traitement rencontrées au CÉRS	49
--	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Procédé de coagulation-floculation avec recirculation des boues	2
Figure 4.1 Influence des réactifs sur l'efficacité du procédé	54

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AF	:	adjuvant de floculation
CA	:	consommations d'alcalinité
CÉRS	:	Centre d'épuration Rive-Sud
DCO	:	demande chimique en oxygène
MEF	:	ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec
MES	:	matières en suspension
MS	:	matières sèches de boue
n	:	nombre d'observations
N_R	:	nombre de Reynolds
P filtrable	:	phosphore filtrable
POR	:	potentiel d'oxydo-réduction
P total	:	phosphore total
r	:	résistance spécifique de la boue
TR	:	taux de recirculation
TSC	:	temps de succion capillaire

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	: Article 1 - Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : performance générale et stabilité du procédé	74
ANNEXE II	: Article 2 - Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : influence des réactifs ..	127
ANNEXE III	: Article 3 - Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : évaluation et validation à grande échelle	181

CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 GÉNÉRALITÉS

La coagulation-floculation est un procédé couramment employé en épuration des eaux usées pour limiter le rejet de certains polluants, tels que le phosphore total et les MES, au cours d'eau récepteur. Ce procédé implique le plus souvent la dispersion instantanée d'un sel métallique trivalent, Al(III) ou Fe(III) , qui déstabilise les particules colloïdales et mène à la formation de micro-flocs. Le pontage de ces micro-flocs, grâce à l'ajout d'un adjuvant de floculation (généralement de type anionique), en font des flocons plus denses et volumineux. La coagulation-floculation s'accompagne également d'autres mécanismes tels que la précipitation chimique, la complexation, l'adsorption à la surface des flocs, l'entrappage ainsi que le balayage. Une simple décantation ou une flottation permet ensuite l'élimination des flocs formés.

Dans le but de réduire la quantité et le coût des produits chimiques nécessaires au traitement, plusieurs auteurs (§1.3) ont étudié la possibilité de recirculer une partie des boues chimiques produites (flocs préformés) au procédé de coagulation-floculation. Cette recirculation permettrait d'exploiter à la fois le pouvoir coagulant résiduel de la boue et sa capacité d'adsorption, tout en fournissant une concentration élevée de noyaux initiateurs de coagulation. Ainsi, elle favoriserait une amélioration des rendements associés au processus de coagulation-floculation. La plupart des travaux de recherches ont toutefois porté sur la recirculation ou la réutilisation des boues d'eau potable, dans un but ultime de diminuer les quantités de coagulant requis pour la purification des eaux potables ou l'épuration des eaux usées. Les caractéristiques de ces boues sont très différentes de celles obtenues en épuration des eaux usées.

Cette thèse, présentée sous la forme d'un regroupement de trois articles scientifiques, se

propose d'évaluer la performance d'un système de traitement des eaux usées par coagulation-floculation qui intègre la recirculation de ses boues chimiques. La réalisation de cette étude vise également à préciser l'influence de chacun des réactifs sur le processus de coagulation-floculation, à étudier la stabilité d'un tel procédé et à comprendre les modalités de mise en oeuvre et de contrôle, jusqu'à un niveau d'application à grande échelle. La figure 1.1 illustre une station d'épuration type qui intègre la recirculation au procédé de coagulation-floculation. Les boues produites au décanteur secondaire peuvent être recirculées soit à l'eau brute (avant l'ajout du coagulant), soit à la sortie du mélangeur rapide (avant l'ajout d'adjuvant de floculation).

Outre cette section, l'*Introduction générale* présente le contexte général de l'étude, la revue de la documentation scientifique pertinente, la problématique spécifique, l'hypothèse initiale de travail ainsi que les objectifs généraux et spécifiques. L'*Introduction générale* est suivie

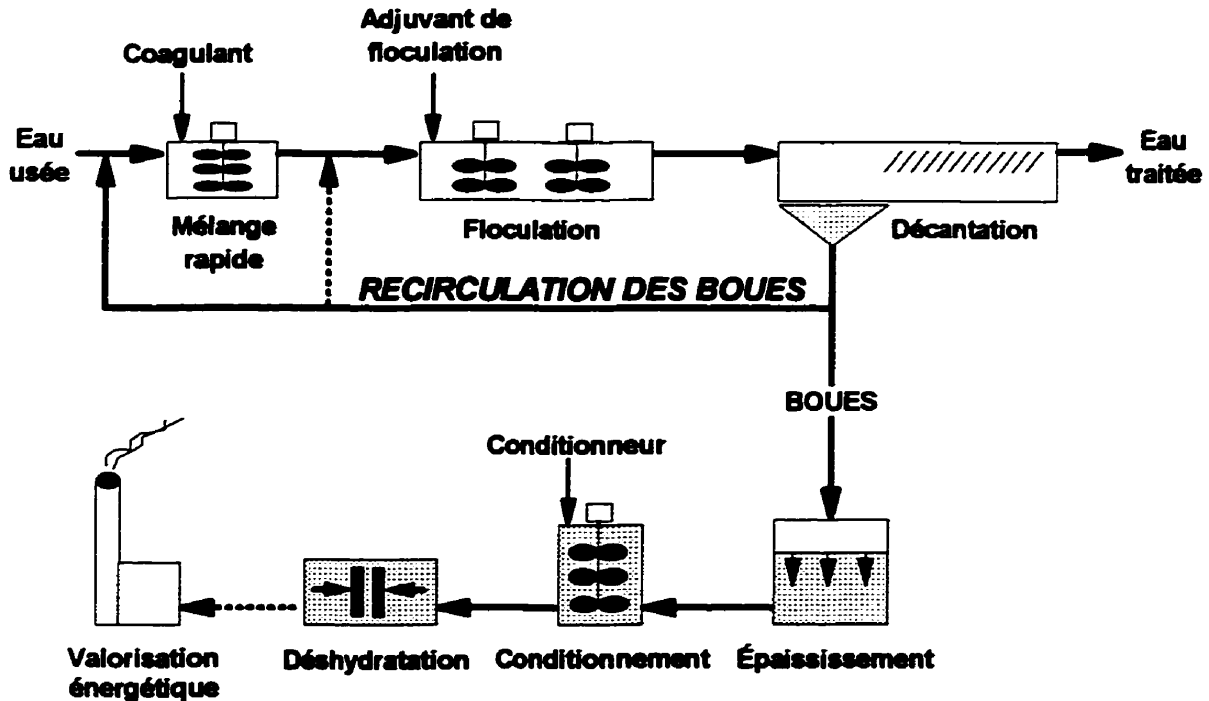


Figure 1.1 Procédé de coagulation-floculation avec recirculation des boues

des chapitres portant sur la *Méthodologie générale* de l'étude et la *Synthèse des résultats et conclusions* de chacun des trois articles scientifiques. Finalement, cette thèse se termine par une *Discussion générale* et une *Conclusion générale* qui inclura, notamment, la formulation de recommandations.

1.2 CONTEXTE GÉNÉRAL

Cette thèse découle des résultats expérimentaux obtenus lors de la réalisation d'un mandat octroyé par le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF) au *Groupe-conseils Génivar inc.* et à la *STEPPE•UQAM* en 1994, portant sur la recherche et le développement de procédés de récupération et de réutilisation des sels métalliques (sulfate d'aluminium, chlorure ferrique, etc.). Ce mandat constituait le troisième volet des orientations stratégiques de recherche identifiées par le MEF concernant la problématique de la déphosphatation des eaux usées municipales au Québec. Les parties scientifique et expérimentale ont été entièrement réalisées sous la responsabilité du candidat, en tant que chargé de projet, au laboratoire de la *STEPPE•UQAM* ainsi qu'au *Centre d'épuration Rive-Sud* (CÉRS) à Longueuil.

L'objectif général du mandat visait à résoudre les problématiques liées à l'intégration de la recirculation de boues chimiques aux infrastructures actuellement existantes dans les stations d'épuration physico-chimiques. Implicitement, la réalisation de ce projet devait ultimement conduire à une diminution des frais inhérents à l'achat de produits chimiques nécessaires au traitement des eaux usées municipales. Les essais ont été menés dans une perspective d'application à grande échelle à la station physico-chimique du *Centre d'épuration Rive-Sud* dont les infrastructures permettent la recirculation des boues produites à partir de ses décanteurs. Par le fait même, les travaux visaient également à approfondir les connaissances relatives aux mécanismes physico-chimiques et aux paramètres de contrôle régissant la coagulation-floculation avec recirculation.

Sur la base de ces travaux de recherche, trois articles scientifiques portant sur le traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques ont été produits et soumis à la *Revue canadienne de génie civil* (Monette *et al.*, 1999a, 1999b, 1999c). Ces articles, présentés aux annexes I, II, et III, abordent consécutivement les trois grandes phases du projet, soit l'évaluation de la performance et de la stabilité du procédé (échelle pilote), l'étude de l'influence des réactifs sur le procédé (échelle laboratoire et pilote) ainsi que l'évaluation et la validation des résultats à grande échelle (CÉRS) :

Article 1 « *Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des (phase 1) boues chimiques : performance générale et stabilité du procédé* »

Article 2 « *Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des (phase 2) boues chimiques : influence des réactifs* »

Article 3 « *Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des (phase 3) boues chimiques : évaluation et validation à grande échelle* »

Les articles sont présentés suivant un cheminement logique qui met en perspective, d'un article à l'autre, les résultats obtenus au cours de la recherche. Les effets de la recirculation sur les caractéristiques des boues produites et sur leur conditionnement ont également été examinés.

1.3 REVUE DE LA DOCUMENTATION SCIENTIFIQUE

1.3.1 Mécanismes impliqués

Initiation de la cristallisation

Selon Khamskii (1969), une augmentation de la taille des particules (cristaux) peut être obtenue en introduisant des cristaux préalablement formés dans la solution à traiter. La matière présente en solution semble être précipitée ou adsorbée de manière préférentielle par les cristaux préformés, qui serviraient de germes initiateurs de cristallisation ou de précipitation. Les travaux de Jenkins *et al.* (1971) ont également montré que l'ajout de cristaux permettait d'initier rapidement la précipitation du phosphate de calcium et d'éliminer la période d'induction précédant normalement la nucléation du précipité. Ainsi, théoriquement, la recirculation de la boue pourrait favoriser l'initiation des floccs, en améliorer la taille et conduire à une décantation rapide et efficace. Toutefois, comme une eau usée contient généralement une concentration importante de noyaux, les avantages reliés à l'initiation des floccs seront, de toute évidence, assez ou même complètement négligeables.

Enlèvement des phosphates

Evers (1973) s'est intéressé plus particulièrement aux mécanismes d'enlèvement des phosphates par l'alun. Il estime que plusieurs mécanismes se produisent alors simultanément. L'alun réagit avec les orthophosphates pour former un précipité colloïdal. Des floccs d'hydroxydes d'aluminium sont également formés par réaction de l'alun avec l'alcalinité de l'eau. Ces floccs peuvent ensuite favoriser la coagulation des précipités colloïdaux de phosphates et des phosphates insolubles et adsorber une certaine proportion de phosphates organiques. Les mécanismes avancés par Evers (1973) expliqueraient la participation d'une boue d'eau potable, formée essentiellement d'hydroxydes d'aluminium, au processus d'épuration des eaux usées.

D'après O'Brien et Warriner (1972), bien que les processus exacts impliqués lors de l'enlèvement des phosphates soient mal connus, l'adsorption est le mécanisme prédominant lors de l'enlèvement des phosphates par les boues de traitement des eaux. De leur côté, Eisenreich et Armstrong (1978) ont démontré, à l'aide d'essais en laboratoire avec des

solutions reconstituées, que les hydroxydes d'aluminium amorphes adsorbent aisément le phosphore organique et inorganique. D'ailleurs, les isothermes d'adsorption tracés respectent bien le modèle classique de Langmuir. Lefort (1995) a tiré des conclusions similaires lors d'essais de captage du phosphore filtrable (eau usée) en présence de boues ferriques d'origine urbaine. La recirculation de boues contribuerait donc à une élimination supplémentaire des phosphates.

Dans cette même perspective, Snoeyink et Jenkins (1980) indiquent que, par rapport à la stoechiométrie (au pH optimal), une quantité supplémentaire de sels d'aluminium est nécessaire pour précipiter les phosphates sous la forme de $\text{AlPO}_{4(s)}$. Cette situation s'explique par le fait que la précipitation des phosphates s'accompagne de celle d'hydroxydes d'aluminium $[\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}]$ et d'une consommation du coagulant due aux impuretés de l'eau. Toutefois, les hydroxydes jouent un rôle essentiel puisqu'ils favorisent l'élimination du précipité de $\text{AlPO}_{4(s)}$ qui est fin et difficile à décanter. Ces auteurs précisent également que les précipités de $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ adsorbent ou incorporent les phosphates. Cette nouvelle phase solide, amorphe, appelée hydroxophosphate d'aluminium $[\text{Al}_x(\text{OH})_y(\text{PO}_4)_z]_{(s)}$, s'incorpore à la boue produite lors du traitement des eaux usées. Ce solide contiendrait initialement un excès d'hydroxydes (OH^-) comparativement à sa forme âgée (vieillie), ce qui suppose que sa recirculation serait efficace pour éliminer les phosphates par effet de substitution des hydroxydes présents (Jenkins *et al.* 1971).

La formation d'hydroxophosphates d'aluminium est également soulignée par Stumm et Morgan (1996). L'excès d'hydroxydes, par rapport aux phosphates présents au sein de la phase solide d'hydroxophosphate d'aluminium, s'amenuiserait avec le remplacement des hydroxydes par les phosphates. Le ratio $\text{OH}^-/\text{PO}_4^{3-}$ au sein du précipité ainsi que ses propriétés d'adsorption sont fortement reliés au pH ainsi qu'au degré d'hydrolyse de l'aluminium à son point d'injection (Jenkins *et al.* 1971). Selon Stumm et Morgan (1962), le phosphate (ligand) a une tendance d'autant plus forte à pénétrer au sein du précipité que

le pH diminue, et ce, afin de satisfaire les besoins de coordination du métal (aluminium). Peu importe la variation du ratio $\text{OH}^-/\text{PO}_4^{3-}$, le nombre total de charges négatives demeurerait constant afin d'assurer l'électro-neutralité du complexe d'hydroxophosphate d'aluminium. À l'inverse, le remplacement des phosphates par les hydroxydes au sein de la phase solide peut également se produire lorsque le pH augmente. Ce fait est également confirmé par Jenkins *et al.* (1971) qui indiquent qu'un largage des phosphates de la boue est anticipé suite à une augmentation de pH.

Mécanismes de coagulation-floculation

Amirtharajah et Mills (1982) précisent que la charge du précipité $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ est faiblement négative à un pH supérieur à 8,0 et fortement positive à un pH inférieur à 7,0. À un pH se situant entre 7 et 8 et à une concentration d'alun de 30 mg/L (2,7 mg- Al^{3+} /L), le précipité formé est chargé positivement. Ainsi, selon ces auteurs, les processus d'entrappage et de balayage («*sweep flocculation*») est amélioré par la possibilité d'une coagulation mutuelle ou d'une hétérocoagulation entre les colloïdes de charges négatives et les précipités de $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ de charges positives. La recirculation d'un tel précipité pourrait donc être bénéfique au traitement des eaux.

Par ailleurs, la théorie relative à la floculation orthocinétique précise que le taux de diminution des particules en suspension augmente en fonction du cube du diamètre des particules formées lors de la coagulation et du nombre de particules (Desjardins, 1990). Cette théorie viendrait donc appuyer la thèse selon laquelle le procédé de coagulation-floculation serait amélioré lorsque des floccs préformés (boue) sont recirculés.

1.3.2 Expériences de recirculation en laboratoire et à l'échelle pilote

Recirculation de boues de traitement d'eau potable

Lanham *et al.* (1984) ont procédé à des essais sur une eau de rivière prédécantée en vue de vérifier le potentiel des boues d'alun (eau potable) comme aide-coagulant. Les essais réalisés en béchers ont servi à identifier le meilleur lieu d'introduction de la boue dans le procédé de coagulation-floculation et à optimiser la quantité à ajouter. Les analyses de turbidité ont permis de conclure que l'ajout de boues avant plutôt qu'après l'injection d'alun menait à une amélioration significative de l'efficacité de traitement. Les auteurs précisent que l'introduction de boue au procédé favorise les contacts entre les particules et leur aggrégation. Les essais ont également révélé que la recirculation d'environ 1 000 mg-MES de boues par litre d'eau à traiter permettait de réaliser une économie du 40% du coagulant.

Monteith et Baldwin (1974) ont réalisé des essais en laboratoire et sur pilotes dans le but de vérifier le potentiel d'utilisation des boues d'alun (eau potable) pour l'enlèvement de phosphates des eaux usées municipales. Selon les résultats obtenus en laboratoire (béchers), les hydroxydes d'aluminium formés durant le processus de purification des eaux sont aptes, à eux seuls, à abattre la majeure partie des phosphates et des MES ainsi qu'une certaine quantité de matière organique. D'autres essais menés à l'échelle pilote ont également permis de conclure à l'efficacité de la boue d'alun, lorsqu'elle est ajoutée en quantité suffisante, pour le traitement des eaux usées. Cependant, de meilleurs résultats peuvent être atteints en ajoutant une petite quantité d'alun commercial avec la boue. En effet, une utilisation conjointe d'alun commercial et de boues d'alun réduirait de 50% l'ajout de coagulant neuf, tout en optimisant l'efficacité du traitement.

De même, une étude effectuée en laboratoire (béchers) par Lavoie et Meloche (1993) a permis d'identifier l'impact d'une recirculation de boues d'alun (eau potable) dans une station d'épuration par étangs aérés à Acton Vale (Québec). Les auteurs ont conclu que la boue acheminée directement à l'entrée du troisième étang de la station, par une conduite indépendante du réseau d'égout, permettrait de respecter les exigences québécoise de rejet de phosphore à l'effluent.

Monteith et Baldwin (1974) se sont également intéressés à la recirculation des boues d'égout issues du procédé même de traitement. Ils ont démontré que cette boue avait les mêmes propriétés que la boue d'alun (eau potable) pour l'enlèvement des phosphates. La recirculation permettrait de réduire les quantités d'alun commercial et de boue d'alun (eau potable) requises pour un enlèvement de phosphates préétabli. Pour être efficace, la boue d'alun doit cependant être recirculée rapidement puisque sa capacité à éliminer les phosphates diminue avec le temps.

Recirculation de boues de traitement d'eau usée

Thomas (1972) a évalué le degré d'élimination des phosphates d'une eau usée lorsque différentes quantités de boues ferriques (10 à 200 mL/L) sont recirculées sans ajout de coagulant. Les résultats ont révélé que la précipitation des phosphates débutait dès que le volume de boue introduit atteignait 60 mL/L. La précipitation augmentait par la suite avec la quantité de boue ajoutée. Aucune donnée n'est par contre fournie quant à la concentration exacte de boues recirculées (mg-MES/L). Une autre séquence d'essais a également été conduite dans le but d'étudier l'effet de différents ajouts de boues ferriques en présence d'une concentration constante de chlorure ferrique (10 mg-Fe³⁺/L). Cette série d'essais a démontré que la recirculation de boues ferriques permettait de tripler l'abattement de phosphates observé avec une injection unique de coagulant à 10 mg-Fe³⁺/L (24% d'abattement). Selon l'auteur, l'ajout de chlorure ferrique assurerait la réactivation de la boue ferrique. Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Monteith et Baldwin (1974) avec une boue d'eau potable.

Par ailleurs, d'autres essais complémentaires menés par Thomas (1972) ont révélé que l'efficacité des boues ferriques à fixer les phosphates diminuait progressivement avec leur vieillissement. Ces résultats corroborent également ceux de Monteith et Baldwin (1974). Selon l'auteur, le vieillissement de la boue peut être contré par l'ajout de chlorure

ferrique (réactivation).

1.3.3 Expériences de recirculation à grande échelle

Plusieurs expériences menées à grande échelle au cours des 30 dernières années ont démontré le potentiel de réutilisation des boues produites par coagulation-floculation. Elles ont impliqué la recirculation de boues d'eau potable et d'eau usée ainsi que l'utilisation d'équipements «hybrides» intégrant la coagulation, la floculation, la recirculation, la décantation et même l'épaississement.

Recirculation de boues de traitement d'eau potable

Pallo *et al.* (1972) ont mené au New Jersey (États-Unis) différentes expériences de recirculation des eaux de lavage des filtres au mélangeur rapide d'une station de traitement d'eau potable. Une amélioration de l'enlèvement de la turbidité et de la couleur a alors été observée. De plus, les floes ainsi formés étaient plus denses et plus compacts et décantaient plus rapidement. Cette pratique a d'ailleurs permis de démontrer que le coagulant commercial employé seul s'avérait moins efficace que son utilisation conjointe avec les boues recirculées.

Par ailleurs, des essais effectués par Wilson *et al.* (1975) à Tampa (Floride, États-Unis) ont révélé que les boues d'alun (eau potable), rejetées à l'égout de façon contrôlée, pouvaient se substituer efficacement à l'alun commercial pour l'épuration des eaux usées. Les auteurs ne fournissent toutefois aucune information sur la concentration de boue utilisée et son taux de dilution dans le réseau d'égout.

Ficquette (1981) a quant à lui étudié l'efficacité du traitement d'une eau de surface par recirculation de boues. Les résultats ont permis de conclure que la boue d'alun contribue

à l'adsorption de la couleur et de la turbidité et permet une réduction de la quantité d'alun commercial requise. Un enlèvement complet de la couleur a été réalisé avec 10 mg- Al^{3+} /L (alun) et 10% (vol./vol.) de boues recirculées. Malgré les bons résultats obtenus, l'auteur propose que l'étude se poursuive pour optimiser les quantités d'alun et de boues à ajouter. De plus, il suggère la réalisation d'essais dans un réacteur dynamique de coagulation-floculation et l'évaluation de l'effet de l'âge de la boue recirculée.

Recirculation de boues de traitement d'eau usée

Stepko (1976) a effectué à Trenton (Ontario) des essais de recirculation de boues d'alun du traitement tertiaire d'une station d'épuration biologique. La recirculation continue des boues décantées à la sortie du bassin d'aération a résulté en une réduction de 57% de l'alun requis pour l'enlèvement du phosphore. De plus, un enlèvement du phosphore filtrable au-delà des quantités stœchiométriques a été observé durant les périodes de faible ajout d'alun commercial. Selon ces résultats, la boue d'alun recirculée avait une grande affinité pour les phosphates.

En Russie, la recirculation de boues a également été employée pour tenter d'épaissir les précipités d'hydroxyde formés lors de l'enlèvement de métaux lourds provenant d'effluents industriels. Ces précipités forment une dispersion fine et captent une grande quantité d'eau lors de leur floculation, produisant des floccs volumineux. La recirculation des floccs modifie la formation de la phase solide et engendre des floccs de dimensions plus importantes ainsi qu'une teneur en eau plus faible dans les boues générées (Ignatenko, 1982; Vainshtein et *al.*, 1988). D'autres essais menés par Bader (1976) pour une teinturerie au Wisconsin (États-Unis) ont confirmé l'efficacité de réutiliser la boue comme noyau de floculation. Cette modification au procédé existant a permis d'accroître l'efficacité d'enlèvement de la teinture tout en produisant des floccs plus lourds qui décantent mieux.

Thomas (1972) a quant à lui démontré, lors d'essais menés dans deux cuves de traitement, que la recirculation de boues ferriques produites lors de la précipitation des phosphates (eau usée) permettait de réaliser des économies de 50% à 66% du chlorure ferrique employé. Les essais ont consisté à produire une boue dans l'une des deux cuves par coagulation-floculation classique (sans recirculation) puis à la réutiliser dans la seconde cuve lors du traitement. L'auteur n'indique toutefois aucun détail quant au protocole expérimental exact suivi lors des travaux. D'autres essais, conduits par ce même auteur dans une station d'épuration biologique en Suisse, ont montré que l'utilisation de boues ferriques pour le traitement tertiaire améliorerait considérablement l'enlèvement des phosphates, tout en permettant de diminuer la quantité de coagulant commercial. La recirculation permettrait également de stabiliser le niveau de phosphates à l'effluent. Aucune donnée n'est fournie quant à la concentration de boues recirculées.

Équipements «hybrides» de recirculation

Eckenfelder (1982) précise que les opérations de coagulation-floculation-clarification peuvent être effectuées dans un équipement unique (floculateur/décanteur) dans lequel un lit de boues est maintenu en suspension. Le recyclage de flocs préformés pourrait, dans certains cas, conduire à une économie de réactifs, à une meilleure qualité de l'effluent, à l'obtention d'une boue plus dense tout en diminuant le temps de formation des flocs. Plusieurs noms ont été donnés à ce procédé qui comporte soit une coagulation-floculation réalisée directement dans une zone de boue, soit une recirculation des boues dans la zone de coagulation-floculation : *clarificateur avec contact de la phase solide*, *clarificateur avec voile de boue*, *unité de clarification avec recirculation de solides*, etc. (ASCE & AWWA, 1990; Bishop et Cichon, 1984; Gupta et Ham, 1983). Ces équipements ont généralement été développés pour des applications en eaux potables ou industrielles. Grâce aux flocs préformés, les réactions chimiques seraient plus rapides et plus complètes. De plus, la recirculation de la boue initierait la croissance des flocs (ASCE & AWWA, 1990). Gupta

et Ham (1983) précisent que de meilleures performances ont été observées lorsque la boue recirculée a été ajoutée avant les réactifs.

De son côté, Dauthuille (1988) précise que, grâce à la recirculation des boues, le floc formé est compact et homogène de sorte que la charge superficielle peut être plus élevée que dans les équipements traditionnels. De plus, un tel système serait apte à absorber des variations de charges contrairement aux observations de Monette *et al.* (1999a). Cependant, aucune comparaison de performance avec les procédés classiques de coagulation-floculation n'est fournie.

Plus récemment, d'autres équipements utilisant la recirculation de boues ont fait leur apparition sur le marché. Ils permettent de combler le manque de noyaux de coagulation dans l'eau à traiter et d'alourdir les floccs formés. En effet, le procédé de type clarificateur à floculation lestée utilise du micro-sable comme noyaux de coagulation pour produire un floc plus dense qui décante plus rapidement. Le sable est ensuite séparé de la boue et recirculé (Cailleaux *et al.*, 1992). Le manque de noyaux de coagulation ne constitue pas un véritable problème en épuration des eaux usées.

1.4 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

1.4.1 Problématique

Trois constats généraux se dégagent de la revue de la documentation scientifique :

- peu d'expériences ont porté exclusivement sur la recirculation de boues chimiques produites lors du processus d'épuration des eaux usées. Dans les faits, la plupart d'entre-elles réfèrent à la recirculation (ou la réutilisation) de boues d'eau potable ou industrielle, boues qui possèdent des caractéristiques très distinctes de celles d'épuration des eaux

- usées (aluminium/fer, MES, phosphates, matières organiques, etc.). Parmi les études répertoriées, seul Thomas (1972) a véritablement abordé l'étude des effets de la recirculation de boues chimiques d'eaux usées urbaines sur la performance du processus de coagulation-floculation. Toutefois, peu de détails sont fournis par l'auteur sur les conditions de mise en oeuvre du procédé et sur les taux de recirculation employés. Cette situation s'explique par une prise de brevet sur ce procédé («The Thomas Process»). Stepko (1976) a également réalisé quelques expériences de recirculation de boues chimiques, mais celles-ci ont été menées dans une station de traitement biologique avec déphosphatation tertiaire. Monteith et Baldwin (1974) ont, quant à eux, conduit plusieurs expériences de recirculation mais dans une perspective de réduction de la quantité de boue d'alun (eau potable) et d'alun commercial requis pour le traitement des eaux usées;
- plusieurs fournisseurs ont développé et mis en marché des équipements «hybrides» de coagulation-floculation qui intègrent la recirculation de boues. Cependant, aucune information (ou donnée) n'a pu être répertoriée sur les performances de ces équipements en comparaison avec celles d'un système classique de coagulation-floculation et sur les conditions exactes de mise en oeuvre du procédé. D'ailleurs, ces équipements ont généralement été conçus et exploités pour des applications en eau potable;
 - peu d'expériences ont comparé parallèlement et avec une même eau usée, les performances d'un procédé de recirculation avec celles d'un système classique de coagulation-floculation (sans recirculation).

De plus, en ce qui a trait à l'étude des mécanismes de coagulation-floculation, les recherches se sont principalement attardées aux phénomènes de captage (ou d'adsorption) des phosphates par les boues d'eau potable ou à l'initiation de la précipitation. Très peu de travaux se sont arrêtés à l'étude, en conditions contrôlées, de l'influence de chacun des réactifs sur les performances d'un procédé de coagulation-floculation avec recirculation. Les informations concernant les équipements «hybrides» ne permettent pas de préciser d'avantage les mécanismes de coagulation-floculation prédominants. La confidentialité liée

à la construction et à l'exploitation de ces équipements brevetés limite certainement l'accès à l'information pertinente sur le sujet. Plusieurs de ces procédés, basés sur le contact préférentiel des micro-flocs fraîchement formés sur un lit de boue, ne s'apparentent pas véritablement à un système de coagulation-floculation plus classique dans lequel les boues générées sont recirculées (ex. : figure 1.1).

Finalement, aucune recherche n'aurait spécifiquement porté sur l'étude des conditions de stabilité d'un tel procédé. L'intégration de la recirculation au procédé de coagulation-floculation permettrait d'absorber les variations de débits et de charges, mais les informations disponibles permettent difficilement d'en juger. De même, peu d'indications sont fournies quant à l'influence du taux de recirculation de boues (flux massique) et du vieillissement de la boue («âge des boues»), suite à sa recirculation cyclique, sur les performances du procédé. De surcroît, le mode de contrôle du procédé, les répercussions de la recirculation sur les paramètres de fonctionnement de la coagulation-floculation ainsi que sur les boues résultantes (caractéristiques, taux d'épaississement, facilité de conditionnement et de déshydratation, etc.) constituent des aspects peu abordés dans la documentation scientifique.

Tous ces *desiderata* sur la recirculation des boues chimiques urbaines, jumelés à l'excellent potentiel associé à la recirculation des boues d'eau potable, ont conduit à la réalisation de cette étude.

1.4.2 Objectifs généraux

L'objectif général de cette thèse vise à répondre à l'hypothèse suivante :

« La boue chimique doit être considérée comme un réactif, au même titre que le coagulant et l'adjuvant de floculation, qui possède des propriétés de traitement effectives »

et quantitatives affectant nécessairement le processus d'épuration des eaux usées par coagulation-floculation. »

Cette hypothèse (ou approche) à la fois simple et originale, implique que l'ajout de boue au procédé doit être réalisé de manière parfaitement contrôlée, tout comme pour le coagulant et l'adjuvant de floculation, afin de profiter entièrement du potentiel de traitement de la boue. L'hypothèse posée s'applique d'ailleurs autant aux boues d'eau potable qu'à celles issues du processus d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles. La recirculation de la boue, bien qu'elle puisse contribuer à abaisser les frais associés à l'achat de produits chimiques dans une station de traitement, devrait plutôt être considérée comme un réactif qui permet d'atteindre une qualité d'eau supérieure à moindre coût. En des termes environnementaux plus larges, la pratique de la recirculation permettrait d'exploiter une ressource, historiquement mise à l'écart, à des fins de traitement des eaux tout en diminuant l'utilisation d'une autre ressource, le coagulant. Toutes ces considérations supposent néanmoins que la boue contribue à des gains de rendements perceptibles.

D'autres objectifs généraux sont également visés par la réalisation de cette étude. Ils se résument à :

- évaluer les performances d'un procédé de traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques, et ce, en comparaison avec un système classique (sans recirculation);
- étudier la stabilité du procédé en fonction des cycles de recirculation de boues et des variations de charges à l'eau brute;
- préciser l'influence de chacun des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation, boue) sur le processus de coagulation-floculation avec recirculation de boues;
- approfondir les connaissances relatives aux mécanismes de coagulation et de floculation mis en jeu lorsqu'une boue est recirculée;

- acquérir des connaissances relatives au contrôle et à la mise en oeuvre du procédé de recirculation et ce, jusqu'à son application à grande échelle, en régime dynamique;
- évaluer les effets de la recirculation sur les caractéristiques des boues produites et sur leur conditionnement;
- quantifier ou estimer les économies potentielles de la recirculation de boues quant aux frais d'achat des réactifs chimiques nécessaires au traitement par coagulation-floculation.

Dans une perspective encore plus générale, cette étude tente de répondre aux attentes environnementales de la population en améliorant l'efficacité d'un système de traitement déjà existant. En effet, une meilleure connaissance du rôle et de l'influence de chacun des réactifs impliqués (coagulant, adjuvant de floculation, boue) permettra de maximiser l'efficacité du processus de coagulation-floculation.

1.4.3 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont ceux des trois articles, présentés respectivement aux annexes I, II et II, correspondant aux phases 1, 2 et 3 de l'étude (Monette *et al.*, 1999a, 1999b, 1999c).

Phase 1 : Performance générale et stabilité du procédé

Le premier objectif de cette phase de l'étude (Monette *et al.* 1999a) consiste à acquérir, à une échelle pilote (réacteurs séquentiels en cuvée), des connaissances sur l'efficacité de traitement et sur la stabilité de fonctionnement d'un procédé de coagulation-floculation d'eaux usées urbaines avec recirculation de boues ferriques et aluminiques. Sa réalisation vise également à mieux comprendre les mécanismes de coagulation et de floculation mis en jeu lors de la recirculation de boues chimiques. La déshydratabilité des boues issues du procédé de recirculation est également brièvement examinée.

Le second objectif de cette phase vise à étudier les conséquences de perturbations dues aux variations de charges de l'eau usée sur la stabilité de traitement par coagulation-floculation avec recirculation de boues alumiques. Les connaissances acquises permettront de mieux prévoir les effets d'une perturbation à une plus grande échelle.

Phase 2 : Influence des réactifs

La seconde phase de l'étude (Monette *et al.* 1999b) cherche à vérifier l'hypothèse selon laquelle la boue chimique est un réactif au même titre que le coagulant et l'adjuvant de floculation. À cette fin, plusieurs séries d'expériences ont été réalisées en laboratoire (bêchers) et à l'échelle pilote dans des réacteurs de coagulation-floculation en cuvette.

Plus spécifiquement, le premier objectif consiste à vérifier et à préciser l'effet de chacun des réactifs ajoutés, le coagulant, l'adjuvant de floculation et la boue, sur la coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques d'origine urbaine. La boue sera considérée comme un réactif nécessaire à la coagulation-floculation, bien qu'elle soit issue du procédé lui-même. Simultanément, une comparaison des performances des différents triplets de concentrations *coagulant • adjuvant de floculation • boue* sera réalisée en vue d'une éventuelle évaluation économique préliminaire. Lors de cette phase, le coût relié à l'ajout de boue sera considéré comme négligeable puisque ce réactif est produit sans frais direct dans une station d'épuration. Cependant, dans les faits, certaines dépenses d'immobilisation et d'opération reliées à la mise en oeuvre de la recirculation seront engagés. Cet aspect ne sera toutefois pas abordé lors de la présente évaluation.

Le second objectif vise à déterminer le lieu d'introduction optimal de la boue dans le procédé de coagulation-floculation. L'atteinte de cet objectif permettra notamment de confirmer (ou d'infirmer) les conclusions tirées par Lanham *et al.* (1984) sur l'avantage de recirculer des boues avant l'injection des réactifs chimiques. Finalement, les travaux réalisés

lors de cette phase visent aussi à améliorer le niveau de connaissances associées aux mécanismes de coagulation et de floculation mis en jeu lors de la recirculation de boues chimiques d'origine urbaine.

Phase 3 : Évaluation et validation à grande échelle

L'objectif général de cette troisième phase (Monette *et al.* 1999c) consiste à améliorer les connaissances reliées à la mise en oeuvre de la recirculation de boues chimiques urbaines dans une station d'épuration existante (CÉRS). Elle vise, d'une part, à comparer le comportement du procédé de coagulation-floculation avec recirculation de boues en régime dynamique avec celui d'un système classique et, d'autre part, à acquérir des connaissances relatives au contrôle du procédé en situation réelle de fonctionnement. Les résultats obtenus permettront de valider les conclusions tirées lors des deux phases précédentes de travaux (Monette *et al.* 1999a, 1999b). De manière plus spécifique, les essais à grande échelle cherchent à :

- étudier l'influence sur le procédé de la concentration de coagulant et d'adjuvant de floculation ainsi que de celle du taux de recirculation;
- vérifier les effets de changements de caractéristiques de l'eau brute (charge) sur la stabilité du procédé;
- déterminer des moyens de contrôle simples du procédé (outils indicateurs de fonctionnement);
- estimer les effets possibles de la recirculation des boues et de leur pompage sur les caractéristiques des boues produites et sur leur conditionnement;
- évaluer l'économie de réactifs chimiques (coagulant, adjuvant de floculation) engendrée par la recirculation de boues.

Pour atteindre les objectifs fixés, l'évolution de la qualité de l'eau traitée dans deux filières

parallèles de traitement (CÉRS) alimentées simultanément par une même eau brute, dont l'une intègre la recirculation, a été suivie. Le CÉRS, station d'épuration de type physico-chimique, peut recirculer ses boues produites aux décanteurs, en amont des flocculateurs, soit après le coagulant, mais tout juste avant l'adjuvant de floculation.

D'autres essais complémentaires de recirculation ont également été réalisés en laboratoire (bêchers) en vue d'améliorer la compréhension de certains résultats obtenus à grande échelle. Plus spécifiquement, ces essais ont porté sur l'étude de l'impact de la pompe de recirculation sur les caractéristiques physiques des boues ainsi que sur l'évaluation du meilleur lieu possible d'introduction de la boue à la station d'épuration du CÉRS.

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

2.1 GÉNÉRALITÉS

Les expériences ont été conduites suivant trois niveaux d'échelle, soit en laboratoire, à l'échelle pilote et à grande échelle (CÉRS). Fait important à noter, les premières séries d'essais (séries I à IV; Monette *et al.*, 1999a) ont été effectuées selon les séquences d'introduction des réactifs du CÉRS, soit l'ajout de la boue après le coagulant, mais avant l'adjuvant de floculation, malgré le fait que la documentation scientifique (Lanham *et al.* 1984) précise l'effet bénéfique d'une recirculation avant l'injection du coagulant. Toutefois, pour évaluer avec plus de justesse le potentiel associé à la recirculation, la boue a été introduite avant l'ajout des réactifs chimiques lors des séries d'essais subséquentes (sauf indication contraire).

2.2 EAUX USÉES ET RÉACTIFS EMPLOYÉS

Tous les essais en laboratoire et à l'échelle pilote ont été réalisés avec des eaux usées dégrillées et dessablées, prélevées au CÉRS. Les coagulants utilisés, au démarrage de l'étude, étaient les deux plus usuels dans le domaine de l'épuration des eaux, soit l'alun $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O]$ et le chlorure ferrique ($FeCl_3$). En raison du comportement assez similaire des deux produits coagulants employés lors des premières séries d'essais (séries I à IV; Monette *et al.*, 1999a), seul l'alun a ensuite été utilisé. Les coagulants ont été injectés dans leur forme commerciale, sans dilution préalable, sauf dans le cas des essais en laboratoire (bêchers) où l'alun a été dilué 10 fois avec de l'eau distillée¹. Ces coagulants ont été employés conjointement avec un adjuvant de floculation de type anionique, le *Percol 902 (Allied Colloids)*. Un conditionneur cationique, le *Percol 757 d'Allied Colloids*,

1. L'eau de dilution a été acidifiée à l'acide sulfurique, à un pH voisin de celui de la solution commerciale de coagulant, de manière à éviter les risques de préhydrolyse de l'aluminium.

a également été employé lors des tests de conditionnement et de déshydratation de boues.

Le coagulant et l'adjuvant de floculation employés lors des essais à grande échelle (CÉRS) ont été respectivement l'alun et le *PAM 703* d'*Allied Colloids* (anionique). Sauf indication contraire, l'alun a été utilisé dans sa forme commerciale sans dilution préalable. Un conditionneur cationique, le *Prosédim CS-243* de *Degrémont Erpac*, a été employé lors des tests de déshydratation de boues. L'eau usée reçue et traitée au CÉRS provenait de sept municipalités et se composait d'un mélange d'origines domestique, pluviale, institutionnelle et industrielle dont la température voisinait 7°C (conditions hivernales). Aucun événement exceptionnel n'est survenu durant les séquences d'essais (pluies violentes, fonte rapide des neiges, etc.).

2.3 ÉQUIPEMENTS

2.3.1 Essais en laboratoire

Les essais de coagulation-floculation (bêchers de 2 L) en laboratoire ont été conduits sur des bancs classiques de coagulation-floculation *Phipps & Birds* (*Richmond*).

2.3.2 Essais à l'échelle pilote

Les expériences à l'échelle pilote ont été réalisées dans des réacteurs séquentiels en cuvette de 100 L de capacité. Le montage expérimental consistait essentiellement en trois colonnes de coagulation-floculation identiques en acrylique de 3,66 m de hauteur et de 0,20 m de diamètre interne et en un réservoir de stockage d'eau usée de 2 500 L équipé d'un système d'agitation. Chacune des colonnes était munie d'un agitateur à vitesse variable (actionnant une tige équipée de cinq pales plates de 5 cm x 10 cm), de trois vannes solénoïdes de prélèvement ainsi que de deux sites d'injection de produits chimiques. L'utilisation des trois

colonnes a permis de décaler le début de chaque essai de manière à permettre la formation de la boue nécessaire aux recirculations subséquentes. La figure 1 (Monette *et al.*, 1999a) illustre l'une des colonnes d'essais.

2.3.3 Essais à grande échelle

Les travaux consistaient à comparer l'évolution de la qualité de l'eau traitée par deux filières parallèles, alimentées par une même eau brute, dont l'une intégrait la recirculation. À cette fin, deux des quatre filières du CÉRS ont été affectées aux expériences, soit la filière A (avec recirculation) et la filière témoin B (sans recirculation). La figure 1a (Monette *et al.*, 1999c) schématise les infrastructures d'essais du CÉRS ainsi que les points d'injection possibles des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation), injections qui ont été effectuées de manière indépendante pour chacune des filières. Toutes les eaux usées ont d'abord subi un dégrillage et un dessablage.

Lors des essais, les boues ont été recirculées depuis la fosse des décanteurs vers la chambre de mélange rapide de chacune des filières (figure 1b; Monette *et al.*, 1999c). Le contrôle de la recirculation de boues était assuré par la pompe à lobes de refoulement, l'ouverture de la vanne située sur la conduite de recirculation ainsi que par des lectures du débitmètre. Le contrôle reposait aussi sur l'équilibre du système puisque la pompe fonctionnait en régime dynamique, peu importe la concentration des boues extraites. Malheureusement, aucune mesure en continu de la concentration de boues recirculées n'a pu être effectuée lors des essais en raison d'une défectuosité des densimètres.

Afin d'évaluer les performances du procédé, des échantillons composés ont été prélevés à l'affluent et à l'effluent de chacune des filières (figure 1a; Monette *et al.*, 1999a). Ces échantillons ont été constitués sur une période variant de 4 à 8 heures (durée selon les séquences particulières d'essais) par des prélèvements à toutes les 15 minutes d'un volume

ponctuel de 250 mL. Le démarrage des échantillonneurs à l'affluent et à l'effluent a été décalé de près d'une heure afin de tenir compte du temps de résidence moyen des eaux usées. Des échantillons instantanés ont également été prélevés quotidiennement dans chacun des flocculateurs et à l'effluent (goulottes de reprise des eaux clarifiées) tel qu'indiqué à la figure 1a (Monette *et al.*, 1999c). Les mesures de MES et de turbidité de ces échantillons ont permis d'évaluer le taux de recirculation instantané et la qualité de son contrôle ainsi que de comparer les rendements instantanés des deux filières. Finalement, des échantillons de boues ont été prélevés journallement par le biais de prises situées sur les conduites de refoulement des boues décantées (en direction des épaisseurs).

2.4 PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

Lors de chacune des séries d'expériences, des essais témoins de coagulation-floculation ont été effectués sans recirculation de boue. Ils ont permis de comparer et d'évaluer directement les performances du procédé de recirculation et, dans certains cas, de générer la boue pour les expériences de recirculation subséquentes.

2.4.1 Phase 1 : Performance générale et stabilité du procédé

Les essais réalisés à cette phase ont tous été conduits à l'échelle pilote sur les réacteurs séquentiels de coagulation-floculation. Les principales phases du protocole expérimental ainsi que le détail des activités correspondantes sont synthétisés au tableau 1 (Monette *et al.*, 1999a). Tous les essais ont été effectués à la température ambiante du laboratoire, soit aux environs de 22°C.

Au total, six séries d'essais ont été complétées (I, II, III, IV, VA et VB). Les quatre premières ont porté sur l'étude de la stabilité de fonctionnement d'un procédé de coagulation-floculation avec recirculation. Ces essais ont permis la recirculation cyclique

de boues ferriques (séries I et II) ou alumiques (séries III et IV) suivant deux taux de recirculation, soit 100% et 50%. La figure 2 (Monette *et al.*, 1999a) présente l'organigramme des essais de recirculation réalisés. Le taux de recirculation correspond au pourcentage de la masse de boue produite par une coagulation-floculation classique (sans recirculation) qui est recirculé. À titre d'exemple, un taux de 50% signifie que 50% de la masse de boue générée par une coagulation-floculation classique est recirculée lors de l'essai subséquent. Ces taux ont également été exprimés en mg-MES/L.

Lors des quatre séries d'essais, les concentrations de coagulants ajoutées ont été fixées à $7,9 \times 10^{-5}$ mol/L. La concentration d'adjuvant de floculation (*Percol 902*) a été arrêtée à 0,35 mg/L pour l'ensemble des essais, avec ou sans recirculation, sauf lors des cycles finaux de chacune des quatre séquences de recirculation alors que la concentration a été augmentée proportionnellement à la masse de boues recirculées.

Deux autres séries d'essais pilotes (séries VA et VB) concernaient l'étude des conditions de stabilité après perturbations de charge (figure 3; Monette *et al.*, 1999a). Suite aux résultats obtenus lors des premières séries d'essais (séries I, II, III et IV), le nombre de cycles de recirculation, après chacune des perturbations, a été limité à trois ou quatre. L'eau brute reçue, considérée comme fortement chargée, a été diluée à deux reprises afin de créer des eaux de moyenne et de faible charges (tableau 3; Monette *et al.*, 1999a). Les concentrations de coagulant et d'adjuvant de floculation ont été respectivement de 2,40 mg- Al^{3+} /L et 0,70 mg/L. Puisque cette phase visait l'étude des conséquences d'une perturbation et non l'importance de l'ajout d'un réactif, la concentration d'adjuvant de floculation a été choisie de manière à ce qu'elle ne limite pas le bon fonctionnement du procédé. Le taux de recirculation adopté visait un équivalent de 200 mg-MES/L.

2.4.2 Phase 2 : Influence des réactifs

Cette seconde phase de travaux de recherche a mené à la réalisation d'essais en laboratoire et à l'échelle pilote. Le tableau 1 (Monette *et al.*, 1999b) présente en détail le protocole suivi lors des essais en béchers. Ce protocole a été fidèlement respecté sauf pour certains essais visant l'étude spécifique du lieu d'introduction de la boue pour lesquels la séquence d'injection des réactifs (boue, coagulant) a été inversée. Les essais menés sur les réacteurs pilotes ont été conduits suivant le protocole détaillé au tableau 1 (Monette *et al.*, 1999a). La boue a toutefois été introduite avant le coagulant et deux minutes ont été allouées pour sa dispersion. Tous les essais ont été effectués à la température ambiante du laboratoire, soit aux environs de 22°C.

Trois séries d'essais (I, II, III) ont été complétées lors de cette phase. La première série, réalisée en béchers, a mené à l'étude de deux lieux d'introduction de la boue, soit aux séquences suivantes d'ajout de réactifs :

séquence 1 : *boue* → *coagulant* → *adjuvant de floculation*

séquence 2 : *coagulant* → *boue* → *adjuvant de floculation*

Les concentrations de coagulant, d'adjuvant de floculation et de boue ont été respectivement arrêtées à 2,4 mg-Al³⁺/L, 0,3 mg/L et 140 mg-MES/L.

La seconde série, également conduite en béchers, a permis l'évaluation des effets de différentes combinaisons de concentrations des réactifs sur le procédé (tableau 2; Monette *et al.*, 1999b). Au total, quatre concentrations de chacun des trois réactifs ont été considérées, menant ainsi à la réalisation de $4^3 = 64$ essais. Les concentrations de boues étudiées correspondaient à des équivalents de charges ajoutées de 57, 228 et 400 mg-MES/L.

Enfin, la troisième série d'essais, conduite avec les réacteurs pilotes, a mené à une étude plus

restreinte des réactifs (tableau 2; Monette *et al.*, 1999b). Au total, deux concentrations de coagulant et quatre d'adjuvant de floculation ont été considérées pour une seule concentration de boues recirculées (16 essais). La concentration de boue, choisie sur la base des résultats obtenus en béchers, équivalait à près de 200 mg-MES/L. Un seul cycle de recirculation a été pratiqué pour chacun des essais pilotes.

Par ailleurs, les boues nécessaires aux trois séries d'essais ont été produites avec chacune des eaux usées concernées, quelques heures avant les expériences, à même les réacteurs pilotes et selon le protocole pré-établi mais sans introduction de boues. Les concentrations d'alun et d'adjuvant de floculation ont alors été arbitrairement fixées à 3,38 mg- Al^{3+} /L et 0,35 mg/L. Bien que cette procédure ne soit pas idéale, elle a facilité la production de boues fraîches non digérées, en quantité suffisante, dans des conditions opérationnelles de laboratoire.

2.4.3 Phase 3 : Évaluation et validation à grande échelle

Essais à grande échelle

Deux séquences d'essais ont été réalisées au CÉRS : la première d'une durée de 113 heures (séquence I) et la seconde s'étalant sur une période de 64 heures (séquence II). La stratégie initiale, qui découlait des résultats des phases précédentes, consistait à exploiter les deux filières de traitement avec une même concentration de coagulant et un taux non-limitatif d'adjuvant de floculation, de façon à observer les gains associés à la recirculation de boues. Après coup, une diminution de la concentration de coagulant à la filière A (avec recirculation) est envisagée, tout en cherchant à obtenir des rendements équivalents aux deux filières. Lors de chacune des séquences, la filière témoin B a été exploitée selon les habitudes de la station, soit l'injection des produits chimiques en fonction de la charge de l'eau brute, de manière à respecter les exigences de rejet imposées par le MEF. Quant à la

filière A, elle a été exploitée, dans toute la mesure du possible, comme suit :

- ajout d'une concentration de coagulant équivalente à celle de la filière témoin B : condition respectée sauf indication contraire (différences moyennes observées entre les filières, inférieures à 1%);
- débit d'eau affluent similaire à celui de la filière témoin B : condition respectée (différences moyennes observées entre les filières, inférieures à 2%);
- ajustement de la concentration d'adjuvant de floculation selon les besoins : condition respectée;
- recirculation de boues contrôlée à un taux jugé suffisant compte tenu de la concentration de coagulant injectée : condition peu ou pas respectée en raison du faible niveau de souplesse des équipements assurant le contrôle du flux massique de boues recirculées.

Certaines conditions particulières devaient être respectées pour pouvoir comparer les résultats :

- alimentation des deux filières avec une eau brute de caractéristiques similaires : condition respectée et vérifiée (différences maximales de 2%; écarts-types comparables);
- exploitation similaire des équipements (mélangeurs rapides, mélangeurs lents, etc.) des deux filières et similitude de leurs infrastructures : condition respectée sauf indication contraire. À cet effet, la différence de longueur entre les canaux d'amenée des eaux coagulées des deux filières doit être signalée (figure 1a; Monette *et al.*, 1999c);
- rendements épuratoires comparables des deux filières en condition normale d'exploitation (sans recirculation) : condition respectée selon les informations disponibles au CÉRS.

Les débits bruts à la station ont atteint des valeurs moyennes de près de 335 000 m³/d et 250 000 m³/d lors de la première et la seconde séquence d'essais. Le débit moyen du CÉRS se situe aux environs de 300 000 m³/d, soit 75 000 m³ par filière. La recirculation de la boue

à la chambre du mélangeur rapide a débuté près de huit heures avant le début des séquences d'essais afin d'atteindre des conditions d'équilibre et une concentration adéquate de boues recirculées.

Essais complémentaires

Deux séries (I et II) d'essais complémentaires de recirculation ont également été réalisées en laboratoire (béchers) en vue d'améliorer la compréhension de certains résultats obtenus à grande échelle (tableau 1; Monette *et al.*, 1999c). Les essais ont porté sur l'étude de l'impact physique de la pompe de recirculation sur la boue ainsi que sur l'évaluation du lieu d'introduction de la boue au procédé en relation avec les conditions du CÉRS. Les essais ont été menés suivant deux procédures expérimentales. La première (procédure n°1) correspond au protocole détaillé au tableau 1 (Monette *et al.*, 1999b). La seconde (procédure n°2) est identique à la première sauf que la boue est introduite après le coagulant et au même moment que l'adjuvant de floculation (simulation des conditions au CÉRS).

D'abord, la série I, conduite selon la procédure n°1, visait à déterminer l'impact physique de la pompe (à lobes) de recirculation sur la boue. Deux échantillons de boues ont ainsi été prélevés dans les heures précédant les essais : le premier après le pompage, par une prise d'échantillonnage installée sur la conduite de refoulement des boues vers les épaisseurs et le second, suite à un écoulement gravitaire (sans pompage) par une prise d'échantillonnage située sur une conduite reliée à la fosse du décanteur. Par ailleurs, la série II, menée selon les procédures n°1 et n°2, cherchait à évaluer l'effet du lieu d'introduction de la boue (prélevée au décanteur) dans les conditions spécifiques prévalant au CÉRS. Les concentrations de réactifs étudiées lors des deux séries d'essais sont présentées au tableau 1 (Monette *et al.*, 1999c).

Chacune des deux boues utilisées a également été soumise à des tests complémentaires de décantation en laboratoire. Ces tests ont consisté à noter la chute de l'interface du lit de boues en fonction du temps dans un cylindre d'un litre. Pour comparer les deux boues sur une même base, leur siccité a été ajustée à une valeur similaire par dilution.

2.5 MÉTHODES ANALYTIQUES

Toutes les analyses ont été conduites selon les méthodes normalisées indiquées au manuel *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al. 1995). Les analyses des MES et des paramètres filtrables ont été réalisées avec des membranes en fibre de verre 934-AH de *Whatman* d'une porosité de 1,5 μm . Les mesures de turbidité ont été réalisées avec un turbidimètre de marque *HACH* (modèle 2100P). Le potentiomètre de marque *HANNA* (modèle HI8314) a servi aux mesures *in-situ* du pH de l'eau et du potentiel d'oxydo-réduction (POR) de la boue. Finalement, les métaux ont été analysés par un système d'atomisation par tube graphite de marque *VARIAN* (modèle GTA-95) après digestion des échantillons à l'acide nitrique.

CHAPITRE 3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

3.1 PHASE 1 : PERFORMANCE GÉNÉRALE ET STABILITÉ DU PROCÉDÉ

Cette première phase de travaux de recherche visait à acquérir des connaissances sur la stabilité de fonctionnement d'un procédé de coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques produites. Elle a également conduit, par comparaison avec un procédé classique de coagulation-floculation, à une première évaluation de sa performance. Les essais ont permis d'établir les premières notions de base concernant le comportement du procédé et les mécanismes de coagulation-floculation.

La réalisation des essais, notamment ceux des séries I, II, III et IV, prenait initialement pour acquis que la recirculation mènerait à des gains effectifs de rendements épuratoires. Les résultats ont toutefois démontré que la simple mise en oeuvre de la recirculation ne conduit pas spontanément à une amélioration des performances du processus de coagulation-floculation. À cet égard, la concentration d'adjuvant de floculation doit être ajustée adéquatement afin de tirer avantage de la recirculation.

Les conclusions générales suivantes découlent des six séries d'essais (I, II, III, IV, VA et VB) conduites à l'échelle pilote avec les réacteurs de coagulation-floculation :

- globalement, les conditions de stabilité sont atteintes dès les premiers cycles de recirculation, indépendamment du taux de recirculation de la boue (50% ou 100%). De plus, aucune dégradation notable de la qualité de l'eau traitée n'a été observée avec le nombre de cycles de recirculation effectués;
- la stabilité du procédé serait réduite par une dispersion inadéquate de la boue au sein de la masse liquide. Cette dispersion affecterait directement la stabilité du procédé (variations des rendements);

- l'intégration de la recirculation de boues au procédé classique de coagulation-floculation favorise une amélioration des rendements épuratoires lorsque la concentration d'adjuvant de floculation est ajustée à la masse de boues recirculées;
- une déficience en adjuvant de floculation entraîne une réduction des vitesses de chute des floes formés et une perturbation éventuelle des rendements obtenus. Cette déficience se reflète plus particulièrement sur l'élimination des MES et du phosphore total;
- des fluctuations de flux massiques de boues recirculées n'exercent pas d'influence significative sur la stabilité et l'efficacité du procédé;
- le procédé réagit rapidement à tout changement de charge de l'eau brute. Contrairement à ce qui était prévu, la masse de boues recirculées ne contribue pas de manière nette à absorber les variations de charges;
- les mécanismes de coagulation-floculation prédominants, dans l'amélioration des rendements par rapport à un procédé classique, sont l'entrappage et le balayage;
- la masse de boues générées est directement proportionnelle au taux de recirculation appliqué. La boue se conditionne et se déshydrate aussi aisément que celle générée par un procédé classique. De plus, la concentration optimale de conditionneur et la résistance spécifique «r» de la boue semblent indépendantes du taux de recirculation;
- une compensation en adjuvant de floculation en fonction de la masse de boues recirculées conduit à des valeurs de matières décantables plus faibles (12% à 23%) des boues produites, à une siccité de boue plus élevée et à une diminution de la concentration optimale de conditionneur de boues.

À l'échelle d'une station d'épuration, ces conclusions signifient que la mise en route instantanée d'un tel procédé ne devrait pas impliquer de difficultés apparentes, notamment si la concentration d'adjuvant de floculation est augmentée en fonction de la masse de boues recirculées. L'opération ne nécessiterait pas un degré de contrôle exagéré du flux massique de boues recirculées. La période de dispersion de la boue et le mécanisme de dispersion constitueraient des aspects critiques à surveiller et à contrôler. Par ailleurs, puisque la masse

de boues recirculées n'assure pas la stabilisation du procédé face aux variations de charges de l'eau brute, le processus habituel d'ajustement des différentes concentrations de réactifs ne serait pas modifié.

Finalement, les performances observées lorsque la concentration d'adjuvant de floculation est ajustée proportionnellement à la masse de boues recirculées sont prometteuses. L'optimisation du procédé devra cependant prendre en considération, en plus du taux de recirculation, la quantité et le coût de l'ensemble des produits chimiques nécessaires au traitement des eaux (coagulant, adjuvant de floculation) et à la déshydratation des boues (conditionneur). Plus précisément, des économies quant aux frais associés à l'achat de réactifs pourront être réalisées suite à un juste choix de taux de recirculation, à une augmentation appropriée de la concentration d'adjuvant de floculation et à un abaissement judicieux de la concentration de coagulant et ce, pour des rendements équivalents.

Les travaux prévus à la seconde phase de l'étude (Monette *et al.*, 1999b) répondent spécifiquement à la problématique associée à l'ajustement des concentrations de chacun des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation, boue). Seule la connaissance de l'influence exacte de chacun de ces réactifs permettra de maximiser la performance du procédé de traitement.

3.2 PHASE 2 : INFLUENCE DES RÉACTIFS

Cette seconde phase de travaux de recherche visait à mieux comprendre l'influence de chacun des réactifs ajoutés, le coagulant, l'adjuvant de floculation et la boue, sur le processus de coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques. De plus, elle cherchait à préciser le lieu d'introduction optimal de la boue et à améliorer le niveau de connaissance des mécanismes de coagulation-floculation.

Tel que mentionné au Chapitre 2, *Méthodologie générale*, trois séries d'essais (I, II et III) ont été réalisées afin d'atteindre les objectifs fixés. Les contraintes reliées à la production de boues fraîches en quantité suffisante expliquent qu'un nombre plus important d'essais aient été menés en laboratoire (bêchers), malgré le fait que ce niveau d'échelle s'éloigne, par rapport à celle pilote, d'une application à grande échelle. Ces essais ont cependant conduit à d'autres essais à l'échelle pilote, dans des réacteurs de coagulation-floculation, de manière à vérifier et valider les tendances observées en laboratoire. Dans tous les cas, les essais ont été jumelés à des essais témoins (sans recirculation) afin de juger des performances relatives du procédé de recirculation.

Les conclusions générales suivantes se dégagent de l'ensemble des résultats obtenus lors de la réalisation de cette seconde phase :

- la boue recirculée participe favorablement au processus de coagulation-floculation. Par rapport aux essais témoins (sans recirculation), les gains de rendements découlant de l'ajout de boue sont meilleurs pour de faibles concentrations de coagulant et lorsque que la concentration d'adjuvant de floculation n'est pas limitative. À l'inverse, plus la concentration de coagulant est élevée, moins l'ajout de boue exerce une influence significative sur les rendements finaux obtenus. Ces tendances ont été observées pour les MES, le phosphore total, la turbidité, la DCO et le phosphore filtrable. L'abattement du phosphore filtrable s'est cependant avéré totalement indépendant de la concentration d'adjuvant de floculation injectée;
- à une concentration constante de coagulant, un accroissement de la concentration de boues recirculées contribue à une amélioration des rendements épuratoires, pourvu que les besoins en adjuvant de floculation soient comblés. En pratique, un taux de recirculation supérieur à 300 mg-MES/L est souhaitable pour tirer profit de la recirculation. Ce taux de recirculation devrait nécessiter une concentration d'adjuvant de floculation de l'ordre de 0,2 à 0,3 mg/L supérieure à celle d'un système de coagulation-

floculation classique;

- l'action physique ou chimique de la boue serait en compétition avec celle du coagulant, même lorsque celui-ci est ajouté après la boue. Le «captage» de polluants par la boue serait même un processus fortement réversible et fonction de la concentration de coagulant injectée, ce qui expliquerait l'atténuation des gains de rendements lorsque la concentration de coagulant augmente. Dans cette perspective, un temps de contact plus important de la boue avec l'eau usée avant l'injection du coagulant ne mènerait pas à de gains particuliers;
- les principaux mécanismes d'action de la boue lors du processus d'épuration des eaux usées seraient l'entrappage et le balayage;
- une carence en adjuvant de floculation mène inévitablement à une dégradation des performances du procédé de coagulation-floculation avec recirculation. À grande échelle, le choix de sa concentration dépendra des infrastructures en place, de la mise en oeuvre des réactifs chimiques, des phénomènes hydrauliques et surtout du flux massique de recirculation;
- les besoins en adjuvant de floculation, en plus d'évoluer avec le taux de recirculation appliqué, augmente de manière significative avec l'accroissement de la concentration de coagulant en raison de la quantité de floes formés. L'adjuvant de floculation serait moins apte à agglomérer des floes (MES) formés par réactions directes du coagulant avec les polluants;
- tel qu'anticipé, les meilleurs rendements sont obtenus lorsque la boue est introduite en amont du lieu d'injection du coagulant et de l'adjuvant de floculation. Les résultats obtenus en béchers ont en effet révélé des gains de rendements de l'ordre de 30% quant aux abattements de MES, de turbidité et de phosphore total.

Afin de diminuer les frais associés à l'achat de réactifs chimiques dans une station d'épuration, la meilleure stratégie consistera à réduire la concentration de coagulant et d'augmenter celle de l'adjuvant de floculation, tout en maintenant un flux massique de boues

suffisant. Les résultats obtenus laissent d'ailleurs entrevoir des économies de l'ordre de 10% si le taux de recirculation est supérieur à 300 mg-MES/L. Les gains dépendront notamment des infrastructures en place et de la concentration de coagulant employée. L'évaluation globale du procédé devra également tenir compte des économies potentielles reliées à la filière solide. L'augmentation du taux de recirculation au delà de 300 mg-MES/L est souhaitable lors d'éventuels essais à grande échelle afin de vérifier si des gains supplémentaires de rendements sont possibles. Toutefois, un taux de recirculation exagérément élevé, en plus de conduire à une augmentation importante de la concentration d'adjuvant de floculation, risquera d'accroître l'âge de la boue et son degré de maturation. Cette maturation, notamment en conditions estivales, pourrait contribuer à une détérioration notable de la qualité de l'eau traitée.

Finalement, la concentration d'adjuvant de floculation devra en tout temps être ajustée en fonction du flux massique de boue. Cette pratique évitera toute situation de déficience qui mènerait, inévitablement, à des problèmes de décantation de floes ou à une dégradation de la qualité de l'eau traitée. Le flux massique de boue constitue un paramètre déterminant du procédé qui nécessitera un suivi et un contrôle particulier. À cet égard, le développement d'un outil indicateur de fonctionnement simple et efficace du procédé devra être privilégié. Ces aspects ont été pris en considération lors de la troisième phase des travaux de recherche (Monette *et al.*, 1999c) portant sur l'évaluation et la validation à grande échelle du procédé de recirculation.

3.3 PHASE 3 : ÉVALUATION ET VALIDATION À GRANDE ÉCHELLE

Cette troisième et dernière phase de travaux de recherche visait à améliorer les connaissances reliées à la mise en oeuvre de la recirculation de boues chimiques urbaines dans une station d'épuration existante. Du même coup, elle cherchait également à évaluer les performances du procédé et à valider les conclusions tirées lors des deux phases

précédentes de travaux de recherche (Monette *et al.*, 1999a, 1999b).

Pour atteindre les objectifs fixés lors de cette phase, deux séquences d'essais de 113 et 64 heures respectivement, ont été conduites à grande échelle au CÉRS. Lors de chacune des séquences d'essais, l'évolution de la qualité de l'eau traitée dans deux filières parallèles alimentées simultanément par une même eau brute, dont l'une intègre la recirculation de boues, a été suivie. Des essais complémentaires ont également été menés en laboratoire pour améliorer le niveau de compréhension des résultats.

Les essais à grande échelle, toujours contraignants lors de leur réalisation, n'ont pas permis de mettre véritablement en valeur le procédé de recirculation. En effet, de manière général, l'intégration de la recirculation de boues au procédé de coagulation-floculation a plutôt conduit à une certaine dégradation de la qualité de l'eau. Néanmoins, cette situation n'a pas empêché l'acquisition de connaissances quant à la mise en oeuvre du procédé de recirculation en régime dynamique. De plus, plusieurs causes ont pu être identifiées lors de ces essais pour expliquer les résultats obtenus. Les essais complémentaires ont d'ailleurs permis d'en préciser certains aspects.

Les conclusions générales suivantes se dégagent des essais réalisés lors de cette troisième phase de travaux de recherche :

- la recirculation, telle que mise en oeuvre au CÉRS, contribue à une dégradation significative de la qualité de l'eau par rapport à un procédé classique et ce, même à une concentration supérieure d'adjuvant de floculation. De manière générale, des valeurs supérieures en MES, en phosphore total et en turbidité, ont été observées à la filière A (avec recirculation). Ces résultats ne corroborent pas ceux des travaux précédents qui avaient démontré les effets bénéfiques de la recirculation;
- les meilleures performances du procédé s'obtiennent lorsque la charge de l'eau brute et

la concentration de coagulant sont faibles. La compétition existant entre l'action physique ou chimique de la boue et celle du coagulant explique cette tendance (Monette *et al.*, 1999b);

- le procédé se comporte de manière comparable à un système de coagulation-floculation classique en réagissant rapidement aux variations de charges de l'eau brute et de concentrations de réactifs. Ainsi, la recirculation ne contribue pas à absorber les variations de charges. De plus, le procédé répond immédiatement à toute modification du flux massique de boues recirculées;
- le système n'aurait pas atteint un équilibre particulier quant à la masse de boues recirculées. Un mode de contrôle du procédé, qui vise un flux massique variable et une concentration constante de MES au flocculateur, devrait être préconisé afin de faciliter l'ajustement de la concentration d'adjuvant de floculation;
- une excellente corrélation existe entre la concentration de MES et la turbidité des eaux au flocculateur. La mesure de la turbidité constituerait un outil indicateur simple, efficace et rapide, du taux de recirculation (coefficient $r^2 = 0,94$);
- les boues produites sont légèrement plus difficiles à conditionner en raison de la présence de fines particules générées par les turbulences induites par la pompe de recirculation. Les difficultés se révèlent plus particulièrement à de faibles concentrations de conditionneur;
- de manière générale, la recirculation mène à des valeurs supérieures de siccité de boue. Ce résultat s'expliquerait d'une part, par la concentration plus importante d'adjuvant de floculation injectée et, d'autre part, par la compression des boues présentes au fond des décanteurs. Une excellente corrélation existe d'ailleurs entre la teneur en MES observée au flocculateur et la siccité des boues;
- à siccité égale, la résistance spécifique « r » d'une boue recirculée serait comparable à celle d'une boue issue d'une coagulation-floculation classique. Toutefois, en pratique, en raison de la siccité plus importante des boues recirculées, la concentration de conditionneur et la valeur de résistance spécifique sont plus élevées;

- la recirculation de boues n'implique pas de problème particulier de maturation ou de production de gaz. Cet aspect devra toutefois faire l'objet d'une attention particulière en périodes estivales.

Les performances observées lors des essais ne permettent pas d'envisager l'intégration de la recirculation de boues au CÉRS, ni d'espérer d'avantages économiques. Les difficultés rencontrées s'expliquent globalement par des infrastructures inadéquates pour intégrer la recirculation, jumelées au fait que les fortes concentrations de coagulant employées au CÉRS ont nécessairement limité les gains potentiels de rendement associés à la recirculation (Monette *et al.*, 1999b). Plus spécifiquement, la géométrie et la conception des équipements (floculateurs, décanteurs) à cette station ne favorisent pas le «balayage» et la «filtration» du liquide par les floes sur toute la profondeur de l'eau lors de la décantation, ce qui limite le captage d'impuretés résiduelles. La disposition des équipements n'offre également pas de conditions hydrauliques idéales, ce qui implique des risques de cisaillement des floes formés. De même, de fines particules sont générées par la turbulence induite par la pompe de recirculation de boues. Enfin, les performances du procédé sont certainement contraintes par un lieu non-optimal d'introduction des boues et un degré de contrôle insuffisant du flux massique recirculées.

Les essais conduits au CÉRS montrent l'ampleur de la problématique associée à l'intégration de la recirculation dans une station d'épuration existante. À lumière des données disponibles, les causes des difficultés de fonctionnement rencontrées s'avèrent nettement plus de nature physique que chimique. Pour cette raison, les bienfaits de la recirculation de boues sur le procédé de coagulation-floculation ne sont pas complètement remis en question. Les recherches futures devront être orientées de manière à contourner les problèmes concrets d'application à grande échelle. Elles devront, entre autres, tenir compte des conditions minimales nécessaires au bon fonctionnement du procédé.

CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE

Différentes expériences de recirculation de boues chimiques sont relatées dans la documentation scientifique. Elles ont impliqué, dans la plupart des cas, la recirculation (ou la réutilisation) de boues d'eau potable pour des fins de traitement d'eau potable ou d'eau usée. Peu d'études ont réellement abordé, en profondeur, les aspects reliés à l'influence des réactifs, à la stabilité, au contrôle et à la mise en oeuvre du procédé de recirculation. Des recherches plus théoriques ont également porté sur la compréhension du phénomène de captage du phosphore filtrable par les boues chimiques. Par ailleurs, certains équipements «hybrides» ont été spécialement conçus dans le but d'intégrer la recirculation de boues au procédé de coagulation-floculation. Ces équipements se distinguent toutefois de manière significative d'un système de coagulation-floculation classique qui intègre une recirculation, puisqu'un lit de boue assurant un contact préférentiel des micro-flocs fraîchement formés y est généralement maintenu en suspension. De plus, leur utilisation relève habituellement d'applications en eau potable. Malgré l'ensemble de ces expériences et le développement de ces équipements intégrés, peu de données existent véritablement sur les performances comparatives d'un procédé de coagulation-floculation qui intègre la recirculation à un système classique. Ce projet de recherche appliqué constituait donc une première étude d'importance, tant sur le plan technique que scientifique, dans cette direction.

Trois niveaux d'échelle ont été mis à contribution lors des différentes phases de l'étude : laboratoire (bêchers), pilote (réacteurs de coagulation-floculation) et grande échelle (*Centre d'épuration Rive-Sud*). Ils ont permis d'évaluer, dans différentes conditions d'essais, les performances du processus de coagulation-floculation qui intègre une recirculation de boues. Les résultats obtenus à ces niveaux d'échelle ont présenté des tendances assez similaires, quoique certaines différences aient parfois été remarquées. Les sections qui suivent synthétisent ces tendances générales.

4.1 BESOINS EN ADJUVANT DE FLOCCULATION

Dès les premières expériences réalisées (séries I à IV; Monette *et al.*, 1999a), la concentration d'adjuvant de floculation s'est révélée un paramètre-clé, au point même d'entraîner certaines modifications au protocole de recherche pré-établi. En effet, à tous les niveaux d'échelle, un ajout supplémentaire d'adjuvant de floculation s'est avéré nécessaire, par rapport à une coagulation-floculation classique, pour assurer une agglomération efficace des floccs formés et leur décantation subséquente. Cet aspect constituait un élément nouveau, quoique logique *a priori*, que la revue de la documentation scientifique n'avait pas permis de mettre en perspective. Par ailleurs, une déficience en adjuvant lors des essais a contribué, à tous les niveaux d'échelle, à une diminution systématique des gains de rendements épuratoires, conduisant à maintes reprises à une dégradation de la qualité de l'eau. Une telle déficience, qui implique une réduction de la taille des floccs et de leur vitesse de chute, a notamment réduit le taux d'enlèvement des MES et du phosphore total.

Par ailleurs, la présente étude n'a pas permis de préciser un ratio entre la concentration d'adjuvant de floculation et celle de la boue recirculée au procédé. Sa valeur dépendra des infrastructures en place, des conditions de mise en oeuvre de la coagulation-floculation, de l'hydraulique du système ainsi que des caractéristiques de l'eau brute. Toutefois, à la lumière des résultats obtenus lors des trois phases d'essais, les besoins augmenteraient de l'ordre de 0,2 à 0,4 mg/L, par rapport à un système de coagulation-floculation classique, lorsque le taux de recirculation se situe en deçà de 400 mg-MES/L. Les résultats obtenus ne tiennent pas en considération le choix d'autres types d'adjuvants de floculation disponibles sur le marché, qui pourraient s'avérer plus performants lorsqu'une boue est recirculée au processus de coagulation-floculation.

Enfin, les essais réalisés à grande échelle (Monette *et al.*, 1999c) ont démontré que la concentration d'adjuvant de floculation pouvait être contrôlée, tout comme un procédé

classique, par de simples observations visuelles des floccs et de la qualité de l'eau inter-floccs au flocculateur. L'ajustement de la concentration dépendra plus particulièrement du mode de contrôle du flux de solides recirculés qui atténuera, de manière plus ou moins importante, les variations des MES présentes au flocculateur. Ces variations sont d'ailleurs fonction des caractéristiques de l'eau brute et de la concentration de coagulant injectée. À cet effet, les besoins en adjuvant de flocculation augmenteront également avec l'accroissement de la concentration de coagulant injectée, qui entraîne la formation d'une plus grande quantité de floccs.

4.2 STABILITÉ ET CONTRÔLE DU PROCÉDÉ

Les séries d'essais menées sur les réacteurs de coagulation-flocculation (séries VA et VB; Monette *et al.*, 1999a), dans le but d'étudier les conséquences de variations de la charge (phosphore total, MES, etc.) de l'eau brute sur la stabilité du procédé de recirculation, ont permis de conclure que la masse de boues recirculées ne contribuait pas à réduire l'effet de ces variations. Le procédé a réagi de manière comparable à un procédé de coagulation-flocculation classique. Ce résultat est assez surprenant compte tenu de la masse de boue mise en recirculation et de certaines affirmations concernant les équipements «hybrides» (Dauthuille, 1988), qui laissent présumer un certain effet tampon. Les essais réalisés à grande échelle (Monette *et al.*, 1999c) ont également permis d'examiner cet aspect. Lors des deux séquences d'essais, les performances du procédé de recirculation ont varié essentiellement selon le même schéma évolutif que celui d'un procédé classique, soit en fonction des variations de la charge de l'eau brute et des concentrations des produits chimiques injectées. Aucun effet tampon n'a été véritablement observé, ce qui corrobore les résultats obtenus à l'échelle pilote.

Dans un même ordre d'idée, les essais menés à l'échelle pilote lors de la première phase de l'étude (séries I à IV; Monette *et al.*, 1999a) n'ont pas révélé de déséquilibres majeurs de

fonctionnement en fonction des nombres de cycles de recirculation. Les conditions de stabilité ont été atteintes dès les premiers cycles de recirculation, indépendamment du taux de recirculation de la boue (50% ou 100%). L'âge de la boue ne serait pas un paramètre critique lorsque la boue est recirculée assez rapidement après sa formation (quelques heures). Par contre, un taux de recirculation exagérément élevé, en plus de requérir une concentration importante d'adjuvant de floculation, risquera d'accroître l'âge de la boue et son degré de maturation ce qui amplifiera les risques d'instabilité de traitement. Par ailleurs, ces mêmes essais ont également montré que la stabilité du procédé pouvait être affectée par une dispersion inadéquate de la boue, avant sa mise en contact avec l'adjuvant de floculation. Une augmentation de la durée de dispersion de la boue aurait toutefois permis de remédier à cette situation.

À grande échelle, le procédé a montré des signes importants de déséquilibres de fonctionnement (instabilités). Ces déséquilibres n'étaient toutefois pas reliés au procédé en lui-même mais plutôt aux équipements disponibles au CÉRS (vanne, pompe, débitmètre, etc.), qui n'offraient pas le niveau de souplesse nécessaire au plein contrôle du flux massique de boues recirculées. Cette situation a conduit, à quelques reprises, à une dégradation de l'eau traitée, en plus de rendre plus hasardeux le choix de la concentration d'adjuvant de floculation. De fait, la recirculation a dû alors être interrompue à quelques reprises, du moins momentanément, afin de rétablir la situation. Néanmoins, le procédé a réagi rapidement à toutes les modifications du flux de solides recirculés, notamment, suite à l'arrêt ou au démarrage de la recirculation. Entre autres, suite à l'arrêt de la recirculation, le procédé a retrouvé les propriétés d'un système de coagulation-floculation classique dans un délai comparable au temps de rétention hydraulique du système. Ces résultats rejoignent parfaitement ceux obtenus à l'échelle pilote.

Quant au mode de contrôle du procédé en régime dynamique (grande échelle), une gestion favorisant un flux massique variable devrait plutôt être préconisée. Ce mode de contrôle

permet de maintenir à tout moment une concentration constante de MES au flocculateur, peu importe l'évolution de la charge à l'eau brute et la concentration de coagulant injectée. Il facilite d'ailleurs fortement l'ajustement de la concentration d'adjuvant de floculation. Par conséquent, le flux massique de boue constituera un paramètre déterminant du procédé, nécessitant un suivi et un contrôle particulier. À cet égard, la mesure de la turbidité pourrait être envisagée comme un outil indicateur de fonctionnement. En effet, une excellente corrélation a été obtenue entre la concentration de MES et la turbidité mesurées dans les eaux du flocculateur. Cet outil permettrait, d'une part, d'évaluer en temps réel les MES présentes au flocculateur (coefficient $r^2 = 0,94$; $n = 34$) et, d'autre part, de faciliter l'ajustement du flux massique de boues recirculées en fonction d'une concentration cible de MES préalablement fixée, en plus de tenir compte des variations de charge de l'eau brute et de la création de MES (micro-flocs) associées à l'injection du coagulant.

En résumé, le procédé mène à des actions (réflexes) assez similaires quant à l'ajustement des concentrations de coagulant et d'adjuvant de floculation dans une station d'épuration. D'ailleurs, il répond immédiatement à toute modification du flux massique de boues recirculées. La masse de boues présente n'assure pas la stabilisation du procédé face aux variations de charges de l'eau brute. Le contrôle adéquat du taux de recirculation, par le biais de mesures de turbidité au flocculateur, permettra d'éviter des problèmes de déséquilibres de fonctionnement, ce qui favorisera le bon fonctionnement du procédé. Ce dernier aspect présume toutefois que la recirculation contribue à des gains de rendements par rapport à une coagulation-floculation classique, ce qui n'a pas été démontré lors des essais à grande échelle.

4.3 LIEU D'INTRODUCTION DE LA BOUE AU PROCÉDÉ

Les performances du procédé de recirculation ont certainement été influencées, du moins dans une certaine mesure, par le lieu d'introduction de la boue au procédé. En effet, les

essais en laboratoire (série I; Monette *et al.*, 1999b) ont démontré que l'introduction de la boue avant l'injection du coagulant, en amont du procédé, conduisait à des gains significatifs de rendements par rapport à une recirculation réalisée en aval du lieu d'injection du coagulant. Les infrastructures du CÉRS n'autorisaient pas une telle pratique puisque la boue devait être introduite après le coagulant, tout juste avant l'adjuvant de floculation. Cette situation a pu limiter les bienfaits associés à la recirculation de boue. Les essais complémentaires, menés en laboratoire (Monette *et al.*, 1999c), ont néanmoins démontré que l'introduction de la boue après le coagulant pouvait tout de même entraîner des gains de rendement liés à une recirculation de boues. Les résultats des premières séries d'essais conduites à l'échelle pilote (séries I à IV; Monette *et al.*, 1999a) montrent la même tendance puisque des gains de rendements ont été observés lorsque les besoins en adjuvant de floculation ont été comblés, malgré le fait que la boue ait été introduite après le coagulant. Dès lors, d'autres causes ont dû être recherchées pour expliquer les difficultés de traitement rencontrées lors des essais à grande échelle.

Par ailleurs, l'injection de la boue après celle de l'adjuvant de floculation serait, quant à elle, définitivement à éviter puisqu'elle ne permet pas à l'adjuvant d'agir efficacement sur l'ensemble des floccs présents. Les instabilités observées lors de la première phase de l'étude (Monette *et al.*, 1999a), possiblement occasionnées par une durée de mélange insuffisante de la boue avant son contact avec l'adjuvant de floculation, permettent d'en juger.

4.4 BOUES GÉNÉRÉES PAR RECIRCULATION

L'étude générale des boues produites par coagulation-floculation, abordée à l'échelle pilote et à grande échelle (Monette *et al.*, 1999a, 1999c), a révélé que la boue issue d'une recirculation présentait une siccité plus élevée que celle de la boue extraite d'un système de coagulation-floculation classique. La concentration plus importante d'adjuvant de floculation injectée et la compression exercée par le lit de boue lorsqu'une boue est

recirculée, expliqueraient l'augmentation des valeurs de siccité observées. Les résultats à grande échelle ont d'ailleurs révélé qu'une excellente corrélation existait entre la teneur en MES mesurée au flocculateur et la siccité des boues extraites des décanteurs (coefficient de corrélation = + 0,95; $n = 8$). En d'autres mots, le taux de recirculation, qui influe directement sur la teneur en MES observée au flocculateur, gouvernerait le taux de compression de boue et influencerait, par le fait même, la siccité des boues résultantes du procédé de recirculation.

En ce qui concerne le conditionnement et la déshydratation des boues, l'analyse des résultats obtenus à grande échelle (Monette *et al.*, 1999c) a révélé qu'à siccité égale, la résistance spécifique « r » des boues recirculées serait comparable à celle d'une boue issue d'une coagulation-floculation classique. Néanmoins, en pratique, en raison de la siccité plus élevée des boues recirculées, la résistance spécifique et les concentrations de conditionneur seront plus grandes. Ces résultats ne corroborent pas parfaitement ceux obtenus lors des essais pilotes (Monette *et al.*, 1999a) qui avaient montré une diminution de la concentration optimale de conditionneur de la boue issue du procédé de recirculation lorsque les besoins en adjuvant de floculation sont comblés. La différence entre les deux niveaux d'échelle pourrait s'expliquer par la présence de fines particules, occasionnée par les turbulences induites par la pompe de recirculation lors des essais à grande échelle. Leur présence contribue à augmenter la surface totale de particules et, par le fait même, à accroître l'utilisation de conditionneur.

Les effets de la recirculation sur l'épaississement, le conditionnement et la déshydratation des boues à grande échelle n'ont pas pu être vérifiés puisqu'au CÉRS, une seule filière sur les quatre en opération intégrait la recirculation. En effet, les boues des quatre filières étaient d'abord pompées vers deux épaississeurs, puis homogénéisées avant d'être finalement conditionnées et déshydratées. D'autres essais à grande échelle permettraient de quantifier les impacts réels d'une recirculation sur la filière de traitement solide.

Finalement, aucun problème de maturation de la boue n'a été observé lors des essais, tant à l'échelle pilote qu'à grande échelle. Notamment, aucune dégradation notable de la qualité de l'eau traitée n'a été remarquée, en fonction des cycles de recirculation de boues, lors des premières séries d'essais menées à l'échelle pilote (séries I à IV; Monette *et al.*, 1999a). Le renouvellement rapide de la boue par une autre fraîchement formée explique cette situation. Des taux de recirculation plus importants, supérieurs à 400 mg-MES/L, pourraient néanmoins conduire à une digestion plus importante des boues, à une production de biogaz et d'odeurs, et ultimement, à un soulèvement des boues produites (par micro-flottation) ou à une décantation moins efficace des floccs formés. Ces aspects méritent une attention plus particulière en périodes estivales, en raison de l'intensification des activités microbiologiques due à l'augmentation de la température des eaux brutes.

4.5 RECIRCULATION DE BOUES FERRIQUES

Bien que la plupart des essais aient porté spécifiquement sur l'étude de la recirculation de boues alumiques, les résultats obtenus peuvent facilement être extrapolés aux boues ferriques produites à partir de sels ferriques (chlorure ferrique, sulfate ferrique, etc.). Les seules séries d'essais réalisées avec un coagulant ferrique (séries I et II; Monette *et al.*, 1999a) ont montré un comportement du procédé comparable à celui observé lors des recirculations de boues alumiques. La qualité de l'eau traitée obtenue ne s'est pas dégradée en fonction du nombre de cycles complétés et les gains de rendements ont été observés, par rapport à une coagulation-floculation classique, lorsque les besoins en adjuvant de floculation ont été comblés. Néanmoins, l'emploi de ce type d'agent coagulant pourrait comporter certains risques pour le traitement en raison de la réduction possible du fer sous forme divalente Fe(II). En effet, la maturation de la boue (oxydation de la matière organique), susceptible de se produire en période estivale alors que l'activité microbiologique s'intensifie, pourrait engendrer une réduction du Fe(III) en Fe(II) et

contribuer au largage de Fe(II) dans l'eau traitée². La recirculation rapide de la boue dès son dépôt au décanteur ou le choix d'un taux de recirculation assurant un renouvellement rapide de la boue, limiterait de manière importante ce phénomène, le cas échéant.

4.6 PERFORMANCES GÉNÉRALES DU PROCÉDÉ DE RECIRCULATION

Les essais réalisés en laboratoire et à l'échelle pilote ont révélé que la boue recirculée pouvait contribuer favorablement au processus de coagulation-floculation. À une concentration constante de coagulant, l'accroissement de la quantité de boues recirculées a conduit à une amélioration des rendements, dans la mesure où les besoins en adjuvant de floculation ont été comblés. Par rapport à une coagulation-floculation classique, les gains de rendements associés à l'ajout de boue se sont affirmés plus particulièrement pour de faibles concentrations de coagulant injectées. À l'inverse, à une concentration plus élevée de coagulant, l'ajout de boue a conduit à des gains marginaux de rendements. Ces tendances ont été observées tant pour les MES, le phosphore total, la turbidité et la DCO que pour le phosphore filtrable. Dans le cas du phosphore filtrable, son abattement s'est toutefois révélé totalement indépendant de la concentration d'adjuvant de floculation injectée.

Par ailleurs, l'intégration de la recirculation au processus de coagulation-floculation à grande échelle (CÉRS) a mené à des résultats tout à fait opposés à ceux des deux niveaux d'échelle précédents. La recirculation de boues a contribué à une dégradation significative de la qualité de l'eau par rapport à un procédé classique, même à une concentration supérieure d'adjuvant de floculation. Tout au long des deux séquences d'essais, des teneurs supérieures en MES, en phosphore total et en turbidité, ont été observées dans l'eau traitée. Néanmoins, les meilleures performances du procédé ont été remarquées lorsque la charge de l'eau brute et la concentration de coagulant étaient faibles. Ces derniers résultats

2. Le Fe(II) est soluble et peu efficace en tant qu'agent coagulant.

corroborent, en bonne partie, ceux obtenus aux deux autres niveaux d'échelle étudiés.

Plusieurs causes ont été identifiées pour expliquer les difficultés de traitement rencontrées à grande échelle (Monette *et al.*, 1999c). Le tableau 4.1, en plus de les énumérer, précise leur incidence sur les rendements. Le niveau de difficultés pour remédier aux problèmes rencontrés ainsi que les besoins en recherche y sont également indiqués. Comme en témoigne le tableau, les causes ont été regroupées en deux catégories : celles qui limitent les gains de rendements liés à l'intégration de la recirculation de boues au processus de coagulation-floculation, et les autres qui nuisent directement aux rendements.

La première catégorie comprend l'effet triturateur de la pompe de recirculation au CÉRS,

Tableau 4.1 Causes des difficultés de traitement rencontrées au CÉRS

Causes des difficultés de traitements	L	N	F	D	R
Trituration et fractionnement de la boue recirculée (ou floes) en de fines particules par la pompe de recirculation.	X			X	X
Lieu inadéquat d'introduction de la boue recirculée (après le coagulant, mais tout juste avant l'adjuvant de floculation).	X		X		
Infrastructures non-optimales pour intégrer la recirculation : géométrie et conception des équipements non adaptées.		X		X	
Degré de contrôle de la recirculation insuffisant.	X		X		X
Conditions hydrauliques peu avantageuses : agitation excessive des floes formés menant à leur bris.		X		X	
Fortes concentrations de coagulant injectées.	X			X	X

L : Limite les gains de rendements associés à la recirculation de boues au processus de coagulation-floculation.

N : Nuit aux rendements de la coagulation-floculation.

F : problème Facile à résoudre.

D : problème Difficile à résoudre.

R : besoins en Recherche pour régler définitivement la source du problème.

le lieu non-optimal d'introduction de la boue recirculée, le degré de contrôle insuffisant du flux massique de boues recirculées et surtout, les fortes concentrations de coagulant utilisées. En effet, tel qu'il a été démontré précédemment, l'utilisation de concentrations plus importantes de coagulant (moyenne pour filières A ou B = $4,0 \pm 1,0$ mg- Al^{3+} /L) restreint les effets bénéfiques de la recirculation. Cette situation s'explique par l'action préférentielle du coagulant sur les polluants aux dépens de celle de la boue (compétitivité).

En ce qui concerne l'effet tritrateur de la pompe, le lieu de recirculation de boues et le contrôle du flux massique de boue, les résultats ont démontré qu'ils ne conditionnaient pas une détérioration de la performance du procédé de coagulation-floculation, mais limitaient toutefois les gains de rendements associés à la recirculation.

La seconde catégorie comprend les problèmes d'infrastructure et d'hydraulique rencontrés lors des essais. Plus précisément, la géométrie et la conception des équipements (floculateurs, décanteurs) au CÉRS ne favorisent pas les mécanismes d'entrappage et de balayage, identifiés comme prédominants lorsqu'une boue est recirculée au procédé (Monette *et al.*, 1999a, 1999b). Le passage de l'eau s'effectuait obligatoirement par des ouvertures en profondeur, situées dans les cloisons séparant les floculateurs des décanteurs, ce qui impliquait un dépôt rapide des floes dès leur entrée aux décanteurs. Les floes formés se trouvaient dans l'impossibilité d'assurer le «balayage» et la «filtration» du liquide sur toute la profondeur de l'eau à l'étape de décantation. Le captage d'impuretés résiduelles s'en trouvait alors fortement limité, ce qui ainsi a empêché tout gain significatif de rendement. La turbidité résiduelle, remarquée tout au cours des essais, permet d'en témoigner. Également, la configuration de ces équipements n'a pas permis d'offrir des conditions hydrauliques idéales, notamment au niveau des ouvertures séparant les floculateurs des décanteurs. Cette situation pourrait avoir contribué aux cisaillements des floes formés.

Par ailleurs, comme en témoigne le tableau 4.1, les besoins en recherche existent plus

particulièrement quant à l'effet triturateur de la pompe de recirculation, au contrôle de la recirculation et aux limites reliées à la recirculation de boues à de fortes concentrations de coagulant. Entre autres, un système d'entraînement à l'eau (hydro-éjecteur) pourrait être envisagé pour recirculer les boues avec un minimum de turbulences. Également, le travail a déjà été entrepris, du moins en partie, en ce qui concerne le contrôle de la recirculation, par le biais d'un outil indicateur de fonctionnement (turbidité). Finalement, d'autres essais sont nécessaires pour évaluer les possibilités de la recirculation à de plus fortes concentrations de coagulant. À cet égard, un taux de recirculation supérieur à 300 mg-MES/L serait souhaitable pour tirer profit de la recirculation. Cependant, un taux élevé de recirculation peut conduire à une augmentation appréciable de la concentration d'adjuvant de floculation requise et à des risques de maturation des boues.

Aucun besoin en recherche n'a été signalé quant au lieu d'introduction de la boue au procédé ainsi qu'aux problèmes d'infrastructures et d'hydraulique du système. Cette étude cherchait à intégrer la recirculation de la boue à un processus de coagulation-floculation déjà existant, et non à modifier les équipements déjà en place. Dans cet esprit, quoique la recirculation ne soit pas applicable au CÉRS, elle pourrait toujours le devenir dans d'autres stations d'épuration.

4.7 MÉCANISMES DE COAGULATION-FLOCCULATION

La réalisation de la première phase de travaux de recherche (Monette *et al.*, 1999a) a permis d'énoncer les premières hypothèses sur les mécanismes de coagulation-floculation prenant place lorsqu'une boue est recirculée. Les essais, conduits à même les réacteurs de coagulation-floculation, ont en effet permis d'observer des floccs atteignant près de 2 cm de diamètre et des vitesses de décantation exceptionnellement rapides comparativement à celles observées lors des essais témoins sans recirculation. De plus, des abattements nettement plus importants ont été obtenus, notamment à la troisième prise d'échantillonnage (prise

inférieure de la colonne d'essais), lorsque la concentration d'adjuvant de floculation suffisait aux besoins de la floculation. De toute évidence, les gains de rendement découlent en grande partie de la capacité du système à former des floccs plus volumineux et en concentration plus élevée comparativement à une coagulation-floculation classique. Ces floccs, en plus d'être aptes à filtrer et entrapper les fines particules résiduelles de l'eau lors de leur chute (phénomène de balayage), présentent d'excellentes propriétés de décantation. Ce fait justifie la définition de la recirculation en termes physiques, soit en équivalent de matières en suspension par litre d'eau (mg-MES/L). Ces observations ont, dès lors, permis d'avancer que les mécanismes de balayage (*«sweep flocculation»*) et d'entrappage (*«enmeshment»*) sont principalement responsables des gains de rendements par rapport à un système classique de coagulation-floculation. Les deux mécanismes précédents sont par ailleurs directement liés à la qualité des pontages obtenus à l'étape de floculation et, par le fait même, à la concentration d'adjuvant de floculation injectée. Bref, les bienfaits de la recirculation seraient logiquement associés à un processus d'ordre plutôt physique que chimique.

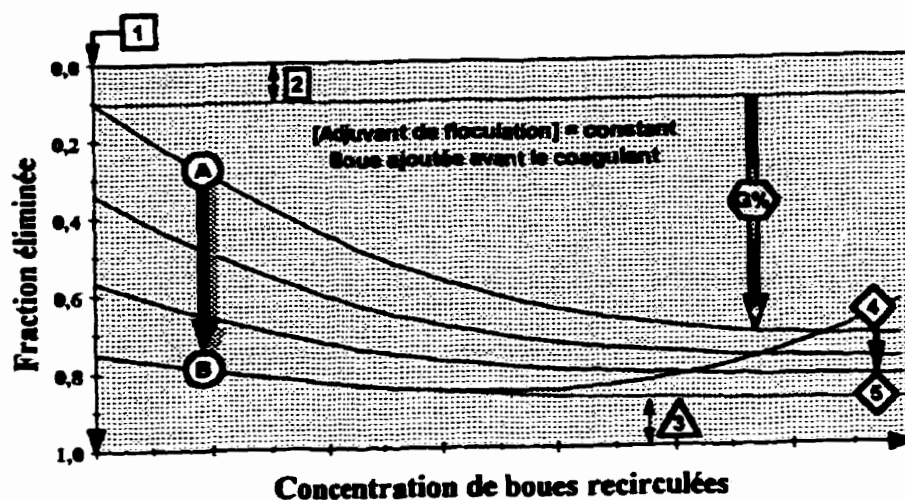
Lors de cette première phase d'essais, le coagulant résiduel au sein de la boue n'a pas semblé contribuer à un gain net de rendement, bien que des consommations légèrement supérieures d'alcalinité aient été observées. Les consommations d'alcalinité s'expliqueraient par une plus grande efficacité du coagulant injecté ou par une adsorption des bicarbonates par la boue. Dans cette même optique, la boue n'a pas semblé jouer de rôle précis quant à l'initiation de la coagulation (noyau de coagulation). Ce résultat était prévu puisqu'une eau usée brute contient normalement un nombre suffisamment élevé de noyaux. Cependant, comme en témoigne les dimensions des floccs obtenus, la boue favorise assurément le processus de floculation en tant que «noyau de floculation». Évidemment, l'adjuvant de floculation joue un rôle prédominant.

Les résultats obtenus pour le phosphore filtrable lors de cette phase de l'étude laissent croire

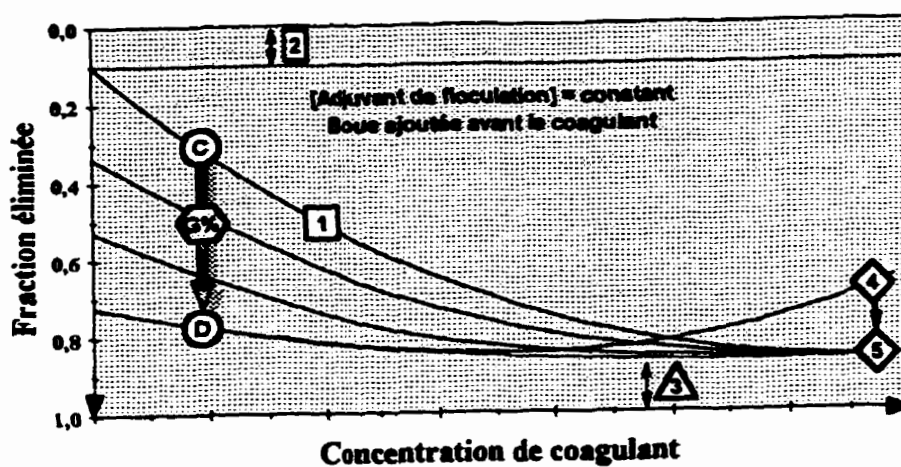
à l'existence d'une compétition entre la réaction directe du phosphore filtrable avec le coagulant et son captage par la boue recirculée. La réaction directe serait d'autant plus prédominante que la concentration du coagulant est importante. De plus, l'ajout du coagulant après celui de la boue mènerait à une «désorption» plus ou moins complète du phosphore filtrable.

La seconde phase de l'étude (Monette *et al.*, 1999b) est certainement celle qui aura contribué le plus à l'avancement des connaissances dans la discipline. En effet, les résultats des essais réalisés en laboratoire et à l'échelle pilote ont permis de tracer, pour la toute première fois, des courbes illustrant l'évolution de la performance du procédé pour différentes concentrations de coagulant et de boues recirculées. Ces courbes, illustrées à la figure 4.1, supposent une concentration d'adjuvant de floculation constante et non-limitative (sauf indication contraire) lors du processus de traitement et qu'une période appropriée a été allouée à la décantation.

La figure 4.1a témoigne d'abord de l'effet d'une augmentation de la quantité de boues recirculées sur la fraction éliminée de polluant (phosphore total, MES, turbidité, DCO). Ces courbes montrent bien la contribution plus importante de la boue au processus épuratoire lorsque la concentration de coagulant diminue (et vice versa). En fait, au fur et à mesure de l'augmentation de la concentration de coagulant, ces gains s'estompent peu à peu en raison de l'action préférentielle du coagulant sur les polluants aux dépens de celle de la boue (compétitivité) et se traduisent même par une dégradation de la qualité de l'eau (courbe 4). Cette dégradation s'explique d'une part, par l'accroissement de la concentration de micro-flocs formés par une forte concentration de coagulant et, d'autre part, par une déficience en adjuvant de floculation. Un ajout supplémentaire d'adjuvant de floculation permet alors de remédier à cette situation. Ainsi, la notion de compétitivité, énoncée pour le phosphore filtrable lors de la première phase d'essais, peut maintenant s'étendre aux autres paramètres de qualité de l'eau.



4.1a Influence de la concentration de boues recirculées



4.1b Influence de la concentration de coagulant

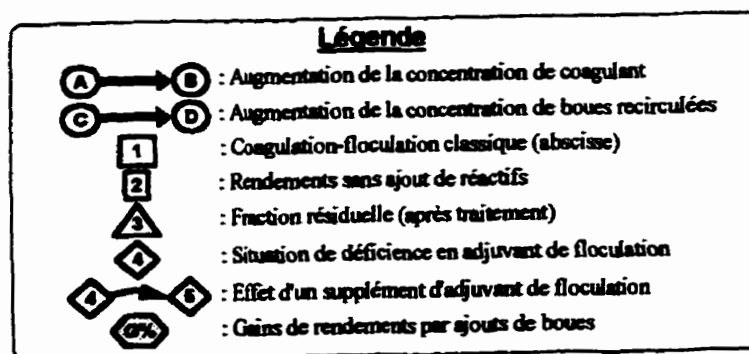


Figure 4.1 Influence des réactifs sur l'efficacité du procédé

La figure 4.1b montre, quant à elle, l'effet d'une augmentation de la concentration de coagulant (en présence de boues) sur la fraction éliminée de polluant. À nouveau, les gains de rendements sont d'autant plus importants que la concentration de coagulant diminue et que celle de la boue augmente. Les gains deviennent ensuite similaires à de fortes concentrations de coagulant en raison de l'action préférentielle du coagulant sur les polluants aux dépens de celle de la boue. Tout comme à la figure 4.1a, une dégradation de la qualité de l'eau peut être observée lorsque la quantité d'adjuvant de floculation devient déficiente.

Des courbes similaires pourraient également être tracées pour le phosphore filtrable. Elles présenteraient toutefois une tendance générale plus linéaire. Cette tendance s'explique par le fait que l'élimination du phosphore filtrable, par opposition à d'autres paramètres qui présentent une forme non-filtrable, dépend essentiellement de l'action directe du coagulant (réaction) et de la boue (captage). Les pentes les plus abruptes seraient observées à de faibles concentrations de coagulant (figure 4.1a) et à de faibles concentrations de boue (figure 4.1b). Les résultats obtenus aux deux niveaux d'échelle étudiés (laboratoire et pilote) ont également révélé, pour de faibles concentrations de coagulant ($< 2,4 \text{ mg-Al}^{3+}/\text{L}$), un abattement en phosphore filtrable allant de 0,08 à 0,10 mg-P/L par 100 mg-MES/L de boue ajoutée. À une plus forte concentration de coagulant ($2,4 \text{ mg-Al}^{3+}/\text{L}$), l'abattement s'est estompé, tout comme pour les autres paramètres de qualité de l'eau, pour devenir plutôt marginaux, soit de l'ordre de 0,04 mg-P/L par 100 mg-MES/L de boue ajoutée (échelle pilote).

En ce qui concerne l'adjuvant de floculation, les résultats ont démontré que les besoins, en plus d'évoluer avec le taux de recirculation appliqué, augmentaient avec l'accroissement de la concentration de coagulant en raison de la quantité de floes formés par coagulation. L'adjuvant de floculation s'avérerait moins apte à «adhérer» aux floes (MES) formés par réactions directes du coagulant. Aucune courbe n'a été tracée dans le but d'illustrer l'effet

de la concentration d'adjuvant de floculation sur les rendements. La concentration choisie ne doit pas répondre à un objectif de traitement donné, mais plutôt satisfaire un besoin précis d'agrégation des micro-flocs. En ce qui a trait au phosphore filtrable, son élimination s'est avérée indépendante de la concentration d'adjuvant de floculation. Ce résultat était anticipé puisque le rôle de l'adjuvant de floculation consiste à assurer le pontage physique des micro-flocs ou des flocs déjà formés.

Par ailleurs, deux équations générales ont été formulées sous une forme simplifiée pour visualiser le processus d'élimination des polluants (**P**) par la boue :



L'équation [1] réfère aux mécanismes de captage considérés au sens très large (adsorption, complexation, etc.), ainsi qu'à ceux de balayage et d'entrappage. Le lien *BOUE*—*P* est présenté à titre représentatif puisque les forces retenant les polluants au sein de la boue sont probablement de nature plus physique que chimique. L'équation [2] réfère au processus général d'échanges d'ions.

Les courbes synthèses tracées aux figures 4.1a et 4.1b laissent supposer que les liens *BOUE*—*P* sont précaires puisque l'ajout de coagulant, après la boue, conduit à une réduction considérable des bénéfices associés à la recirculation. En d'autres mots, le coagulant s'accaparerait les impuretés initialement captées par la boue pour compléter sa réaction et aboutir à un composé plus stable chimiquement. Les «réactions» formulées par les équations [1] et [2] seraient par conséquent fortement réversibles. Les cinétiques réactionnelles des réactions de réversibilité seraient d'ailleurs dictées par celles du coagulant.

En résumé, la facilité avec laquelle le coagulant s'accapare des impuretés aux dépens de la boue laisse présumer que l'association *BOUE—P* n'est pas solide et que le mécanisme d'action de la boue est nettement plus physique que chimique. Le coagulant présent au sein de la boue ne possède pas de pouvoir résiduel très apparent. À la lumière des résultats obtenus, les mécanismes généraux prédominants, qui conduisent à une amélioration des rendements par rapport à un système classique, seraient de prime abord l'entrappage et le balayage. L'adsorption et la complexation doivent également être considérées, mais dans une moindre mesure.

Finalement, comme les essais à grande échelle (Monette *et al.*, 1999c) cherchaient à répondre à la problématique générale reliée à l'intégration de la recirculation dans une station d'épuration existante (CÉRS), les aspects reliés aux mécanismes de coagulation-floculation n'ont pu être réellement abordés. Toutefois, les conditions suivantes doivent toujours être respectées lorsqu'une boue est recirculée au procédé de coagulation-floculation à grande échelle dans le but d'améliorer l'efficacité du procédé. Les infrastructures en place à la station d'épuration doivent à tout égard permettre de sauvegarder l'intégrité physique des floes formés. De plus, dans la même optique, le mécanisme de recirculation (pompe) et les conditions hydrauliques qui prévalent dans les flocculateurs et les décanteurs ne doivent pas conduire au cisaillement des floes formés suite à une recirculation. Ces floes, bien qu'ils soient plus volumineux, pourraient être plus fragiles et leur bris mènerait à la création d'une turbidité résiduelle supplémentaire dans l'eau traitée. À cet effet, ces conditions n'existaient pas réellement lors des essais menés à grande échelle au CÉRS.

Idéalement, les équipements de décantation d'une station d'épuration doivent assurer la chute des floes sur une hauteur d'eau suffisante pour bénéficier au maximum des mécanismes d'entrappage et de balayage associés à la recirculation. Dans cette optique, le système de coagulation-floculation en cuvée constituerait, en toute logique, celui le plus apte à maximiser les bénéfices associés à la recirculation. De plus, les résultats obtenus en

laboratoire et à l'échelle pilote ont clairement montré les avantages implicites de la recirculation lorsque la concentration de coagulant injectée est faible. Ainsi, la recirculation pourrait être employée sporadiquement certaines journées, ou même au cours d'une même journée, lorsque la concentration de coagulant est faible. Cette pratique suppose un ajustement rapide du flux massique de boues recirculées lorsque cette condition est rencontrée. La réaction rapide du procédé, suite à des modifications du flux massique lors des essais au CÉRS, notamment suite à l'arrêt ou au démarrage de la recirculation, laisse entretenir cette possibilité.

4.8 ASPECTS ÉCONOMIQUES

Les performances observées lors des essais à grande échelle ne permettent pas d'envisager la recirculation de boues au CÉRS, ni d'entrevoir d'intérêts financiers particuliers. Lors de ces essais, l'eau traitée a généralement présenté une turbidité résiduelle plus importante ce qui a fait échouer toutes tentatives de réduction de la concentration de coagulant. Ainsi, des coûts supplémentaires ont plutôt été observés en raison de l'augmentation des besoins en adjuvant de floculation. Différentes causes ont déjà été énoncées pour expliquer cette situation, spécifique à cette station d'épuration (§ 4.6 et Monette *et al.*, 1999c).

En revanche, les résultats obtenus en laboratoire et à l'échelle pilote ont permis d'observer des gains de rendements épuratoires par rapport à un système classique de coagulation-floculation. Selon ces résultats, pour une station d'épuration opérant normalement à des concentrations respectives d'alun et d'adjuvant de floculation (*Percol 902*) de 4,0 mg- Al^{3+} /L et de 0,35 mg/L, des économies de l'ordre de 10% des frais d'achat de réactifs chimiques peuvent être espérées si le taux de recirculation est ajusté entre 300 et 400 mg-MES/L. Ces économies seront obtenues suite à une réduction de la concentration de coagulant et à une augmentation de celle de l'adjuvant de floculation, tout en maintenant le flux massique à la valeur indiquée. Puisque la concentration d'adjuvant de floculation injectée à la filière

liquide affecte les caractéristiques des boues produites, l'évaluation globale du procédé devra également tenir compte des frais associés à l'achat du réactif chimique nécessaire au conditionnement et à la déshydratation de ces boues. Les gains obtenus dépendront évidemment des infrastructures en place à la station d'épuration et du coût de mise en oeuvre de la recirculation. Dans cette optique, la recirculation de boues ne pourra être bénéfique à une station d'épuration que si celle-ci respecte certaines conditions minimales, découlant de la présente étude. Ces conditions se réfèrent notamment aux infrastructures en place, à la concentration de coagulant usuellement employée, aux équipements utilisés pour recirculer les boues, au lieu d'introduction de la boue au procédé ainsi qu'au niveau de contrôle du flux massique de recirculation de boues.

Enfin, dans une toute autre perspective, quoique les essais aient démontré les effets bénéfiques associés à la recirculation, du moins en laboratoire et à l'échelle pilote, le potentiel économique le plus grand réside dans la réutilisation des boues d'eau potable pour des fins d'épuration des eaux usées. Ce type de boue possède un pouvoir coagulant reconnu, notamment lorsqu'elle est acidifiée. Bien que la recirculation des boues d'eau potable ait été fréquemment étudiée par le passé, très peu d'expériences de réutilisation à grande échelle, autre qu'une simple gestion à l'égout, ont pu être répertoriées dans la documentation scientifique. D'un point de vue purement économique, ce sujet mérite une attention toute particulière.

CHAPITRE 5 CONCLUSION GÉNÉRALE

Le principal objectif de cette étude consistait à évaluer les performances d'un procédé de traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques, comparativement à un système classique (sans recirculation). Les travaux entrepris cherchaient également à étudier la stabilité du procédé et à comprendre l'influence de chacun des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation, boue) sur le processus de coagulation-floculation, et à acquérir des connaissances sur les mécanismes de mise en oeuvre et de contrôle du procédé ainsi que sur les effets de la recirculation sur les caractéristiques des boues produites et leur conditionnement. Du même coup, les essais ont permis d'approfondir les connaissances relatives aux mécanismes de coagulation et de floculation mis en jeu lorsqu'une boue chimique est recirculée.

Cette étude découle d'un mandat contractuel, réalisé et complété principalement à la *STEPPE•UQAM*, qui cherchait à résoudre les problématiques liées à l'intégration de la recirculation de boues chimiques aux infrastructures existantes dans les stations physico-chimiques. Dans ce cadre, le projet devait ultimement démontrer la possibilité de réduire les frais associés à l'achat de produits chimiques nécessaires au traitement des eaux usées municipales. Ce mandat s'inscrivait dans le troisième volet des orientations stratégiques de recherche identifiées par le MEF concernant la problématique particulière de la déphosphatation des eaux usées au Québec.

Pour atteindre les objectifs fixés, trois phases d'essais expérimentaux ont été réalisées à trois échelles différentes : laboratoire (bêchers), pilote (réacteur de coagulation-floculation de 100 litres) et grande échelle (*Centre d'épuration Rive-Sud*). La première phase de travaux a mené à une première évaluation de la performance générale et de la stabilité du procédé de recirculation. Cette phase a nécessité la réalisation de six séries d'essais conduites à l'échelle pilote en simulant des recirculations séquentielles de boue. La seconde phase s'est

ensuite arrêtée à l'étude de l'influence des réactifs sur le procédé. Elle a mené à la réalisation de trois séries d'essais à deux niveaux d'échelle différents, soit en laboratoire et à l'échelle pilote. Finalement, la troisième phase a permis une évaluation du procédé à grande échelle ainsi qu'une validation des résultats obtenus lors des deux phases précédentes. Lors de cette phase, deux séquences d'essais de 113 et 64 heures ont été menées en suivant l'évolution de la qualité des eaux traitées dans deux filières parallèles alimentées simultanément par une même eau brute, dont l'une intégrerait la recirculation. Chacune des phases a fait l'objet d'un article scientifique présenté en annexe.

Les conclusions générales suivantes se dégagent de cette étude :

- les résultats obtenus en laboratoire et à l'échelle pilote démontrent que la boue recirculée participe favorablement à la coagulation-floculation. Les gains de rendement s'observent plus particulièrement pour de faibles concentrations de coagulant et lorsque celle de l'adjuvant de floculation n'est pas limitative. Les meilleures performances sont obtenues lorsque la boue est introduite avant le coagulant et l'adjuvant de floculation. Des résultats tout à fait opposés sont obtenus à grande échelle. En effet, la recirculation contribue à une dégradation significative de la qualité de l'eau par rapport à un procédé classique. Les difficultés de traitement observées à grande échelle s'expliquent essentiellement par des infrastructures inadéquates à cette station pour intégrer la recirculation. La forte concentration de coagulant employée a également limité les gains de rendements associés à la recirculation. Compte tenu des résultats obtenus, la recirculation de boues ne peut être envisagée au *Centre d'épuration Rive-Sud*;
- à l'échelle pilote, la stabilité du procédé est atteinte dès les premiers cycles de recirculation. À grande échelle, le procédé montre certains signes évidents de déséquilibres de fonctionnement (instabilités). Cette situation est attribuable aux équipements en place qui n'offrent pas un niveau de contrôle suffisant du flux massique de boues recirculées. Les résultats à l'échelle pilote révèlent également que la stabilité du

procédé pourrait être affectée par une dispersion inadéquate de la boue, avant sa mise en contact avec l'adjuvant de floculation;

- la recirculation de boues au procédé de coagulation-floculation ne permet pas d'absorber les variations de la charge (phosphore total, MES, etc.) de l'eau brute. De fait, comme une coagulation-floculation classique, le procédé réagit instantanément à des modifications de charges de l'eau brute et de concentrations de réactifs. De plus, il répond rapidement à toute modification du flux de solides recirculés;
- l'âge de la boue ne constitue pas un paramètre critique à surveiller lorsque la boue est recirculée assez rapidement après sa formation (quelques heures);
- la mesure de la turbidité des eaux du flocculateur constituerait un excellent outil indicateur pour évaluer, en temps réel, le taux de recirculation (en mg-MES/L). Une excellente corrélation a été obtenue entre la concentration de MES et la turbidité;
- pour bénéficier de meilleurs rendements par rapport à un système classique, la concentration d'adjuvant de floculation doit être augmentée en fonction de la masse de boue mise en recirculation. Toute déficience mènera à une dégradation de la qualité de l'eau traitée;
- les bienfaits de la recirculation seraient associés à un processus plutôt physique que chimique. Les mécanismes prédominants de coagulation-floculation identifiés, responsables des gains de rendements par rapport à un système classique de coagulation-floculation, sont le balayage (*«sweep flocculation»*) et d'entrappage (*«enmeshment»*). Les gains de rendements découlent, en grande partie, de la capacité du procédé à former des floccs plus volumineux et en concentration élevée par rapport à une coagulation classique. Ces floccs, en plus de présenter d'excellentes propriétés de décantation, sont aptes à filtrer et entrapper les fines particules résiduelles de l'eau lors de leur chute;
- le taux de «captage» d'impuretés par la boue, bien qu'il augmente avec le taux de recirculation, serait réversible et assujéti à la concentration de coagulant injectée. De plus, le «captage» est fortement lié à la qualité des pontages obtenus à l'étape de floculation et, par le fait même, à la concentration d'adjuvant de floculation employée;

- la siccité de la boue issue d'une recirculation est plus élevée que celle extraite d'un système de coagulation-floculation classique. La concentration plus importante d'adjuvant de floculation injectée et la compression exercée par le lit de boues expliqueraient ce résultat;
- à siccité égale, la résistance spécifique des boues recirculées semble comparable à celle d'une boue issue d'une coagulation-floculation classique. Toutefois, en raison de la siccité plus élevée des boues recirculées, la résistance spécifique et les concentrations du conditionneur de boues seront plus grandes;
- les résultats obtenus en laboratoire et à l'échelle pilote laissent entrevoir des économies de l'ordre de 10% du coût d'achat des réactifs chimiques, si le taux de recirculation est ajusté entre 300 et 400 mg-MES/L.

À la lumière des résultats obtenus, et pour répondre à l'hypothèse de travail initialement posée à l'*Introduction générale*, la boue peut être considérée comme un réactif qui, au même titre que le coagulant ou l'adjuvant de floculation, possède une capacité de traitement. Cette capacité serait cependant nettement plus physique que chimique. Pour profiter au maximum des avantages associés à la recirculation de boues, celle-ci doit être recirculée de manière contrôlée, et dans des conditions de mise en oeuvre adéquates. Les ajouts de coagulant et d'adjuvant de floculation devront nécessairement être réalisés en fonction du taux de recirculation choisi. Par ailleurs, la recirculation affecte véritablement le processus d'épuration des eaux usées par coagulation-floculation, notamment lorsque la concentration de coagulant utilisée est faible. À forte concentration de coagulant, son effet sur le processus global de traitement s'avère nettement moins important. La pratique de la recirculation, quoique relativement simple à mettre en place, nécessite néanmoins un bon niveau de compréhension du procédé.

La contribution de cette étude à l'avancement des connaissances scientifiques et techniques peut être jugée comme importantes à plusieurs niveaux. D'abord, elle a mené à l'acquisition

de notions scientifiques reliées à la recirculation de boues chimiques d'origine urbaine (eau usée). Peu de travaux se sont spécifiquement intéressés à ce type de boues. Les essais ont permis d'évaluer et de comparer, de manière assez exhaustive, les performances du procédé de recirculation avec celles d'un système classique de coagulation-floculation, suivant trois niveaux d'échelle (laboratoire, pilote, grande échelle). Cette étude a également abordé, pour la première fois, les notions reliées à la stabilité du procédé, à l'influence individuelle des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation et boue) sur le processus de coagulation-floculation, aux impacts de la recirculation sur les caractéristiques des boues résultantes, ainsi qu'aux mécanismes de contrôle du procédé. Finalement, les essais à grande échelle (CÉRS) ont conduit à une toute première expérience comparative simultanée, en régime dynamique, de deux filières de traitement alimentées avec une même eau usée, dont l'une intègre la recirculation. Ces essais ont contribué, entre autres, au développement d'un premier outil indicateur de fonctionnement du procédé et à mieux connaître les besoins physiques (infrastructures, pompes de recirculation, etc.) associés à la bonne mise en oeuvre de la recirculation.

Par ailleurs, certaines considérations doivent être formulées quant aux essais réalisés lors de cette étude et à leur éventuelle poursuite.

D'abord, les essais menés en laboratoire et à l'échelle pilote, lors de la première et la seconde phase de l'étude (Monette *et al.*, 1999b), ont impliqué des productions préalables de boues à même les réacteurs pilotes de coagulation-floculation. Les concentrations de coagulant et d'adjuvant de floculation utilisées lors de ces productions ont été respectivement de 3,38 mg-Al³⁺/L et 0,35 mg/L, malgré le fait que les essais subséquents ont été réalisés avec des concentrations de réactifs différentes. Cette procédure visait à faciliter la production de boues fraîches et non digérées, en un volume suffisant dans des conditions de laboratoire. Bien que les essais n'aient pas révélé de pouvoir coagulant résiduel évident de cette boue, cet aspect devra être considéré lors d'éventuels travaux de

ce genre. À cet égard, des essais de coagulation-floculation à l'échelle pilote, menés à un même taux de recirculation (mg-MES/L), mais avec des boues produites à différentes concentrations de coagulant et d'adjuvant de floculation, sont fortement suggérés.

Cette étude n'a pas permis d'étudier certains aspects relatifs à la mise en oeuvre du processus de coagulation-floculation. En outre, l'optimisation des intensités de mélange lors de l'injection des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation, boue) et des périodes allouées à la floculation et la décantation n'a pas été abordée. Ces questions pourront faire l'objet d'une analyse approfondie lors de travaux de recherche ultérieurs.

Les essais réalisés à grande échelle au CÉRS n'ont pas véritablement permis d'isoler les effets de modifications de charges superficielles (ou de débits) sur les performances du procédé de recirculation. Le procédé de recirculation pourrait être particulièrement avantageux, par rapport à un système classique, puisqu'il mène normalement, lorsque les conditions le permettent, à la formation de flocs volumineux avec d'excellentes propriétés de décantation. De plus, l'impact de la différence de longueur entre les canaux d'amenée des eaux coagulées des deux filières mises à l'essai au CÉRS n'a pu être estimé. *À priori*, selon les informations disponibles à la station, la différence de rendements entre les deux filières serait négligeable.

Une certaine mise en garde doit également être formulée quant à l'utilisation d'une concentration supplémentaire d'adjuvant de floculation. Ce type de réactif est généralement constitué de chaînes d'acrylamides dont la toxicité est assez bien reconnue. Les impacts environnementaux reliés à son utilisation en épuration des eaux usées sont toutefois méconnus. Un juste choix de la concentration d'adjuvant de floculation limite généralement sa teneur résiduelle dans l'eau traitée. En supposant que sa concentration résiduelle soit faible dans l'eau traitée, l'adjuvant de floculation se retrouvera nécessairement en quantité plus importante dans les boues recirculées produites par rapport aux boues classiques.

L'évacuation finale des boues fera alors l'objet d'une préoccupation environnementale, sauf si les boues sont incinérées. Cet aspect mérite certainement d'être approfondi lors d'éventuels travaux de recherche. Du moins, le choix d'un adjuvant de floculation peu ou pas toxique devrait être considéré lorsqu'une boue est recirculée au procédé de coagulation-floculation.

D'autres aspects, qui n'ont pas été traités dans le cadre de cette étude, pourront être abordés lors d'éventuels travaux de recherche portant sur la recirculation des boues chimiques. Ils concernent, entre autres :

- l'étude de concentrations plus élevées de boues recirculées (> 400 mg-MES/L), tout en s'assurant de vérifier l'impact du vieillissement des boues, notamment en période estivale;
- l'étude du ratio de la concentration d'adjuvant de floculation à celle de la boue;
- la différenciation de la contribution physique et chimique de la boue au traitement;
- l'évaluation d'autres types de réactifs (coagulants, adjuvants de floculation);
- l'étude des vitesses de chute des floccs et de leur résistance au cisaillement (en comparaison avec les floccs formés lors d'une coagulation-floculation classique);
- l'analyse approfondie des effets de la pompe de recirculation sur les performances du procédé de recirculation. Cette analyse pourra conduire au développement d'un équipement de recirculation (système de pompage) adapté aux besoins du procédé ou à l'examen d'autres types de pompes disponibles sur le marché;
- le contrôle des flux massiques de boues recirculées.

Les nombreuses voies de recherche conduiront nécessairement, à long terme, à une amélioration des performances du procédé de coagulation-floculation.

Enfin, cette étude, réalisée à trois niveaux d'échelle différents, a révélé l'ampleur du travail associé à la démonstration des avantages de la recirculation et à son intégration dans une

station d'épuration. Les essais en laboratoire et à l'échelle pilote, bien qu'ils ne reproduisent pas parfaitement les conditions réelles de traitement, ont contribué de manière importante à l'acquisition de connaissances reliées au sujet. Ils ont d'ailleurs permis une interprétation plus pertinente et complète des résultats obtenus à grande échelle. De plus, les résultats obtenus aux différents niveaux d'échelle ont généralement montré des tendances similaires, ce qui confirme la justesse de la démarche poursuivie. La poursuite des travaux de recherche est évidemment suggérée puisqu'elle permettra de démontrer, hors de tout doute, les effets bénéfiques associés à la recirculation à grande échelle. Le choix de la station d'épuration influencera directement les résultats d'une telle démonstration. Entre autres, les infrastructures en place et les conditions de mise en oeuvre du procédé de recirculation devront, au préalable, être favorables au processus de recirculation. Les notions acquises lors de cette étude faciliteront certainement toutes les tentatives de démonstration des performances du procédé à un tel niveau d'échelle.

RÉFÉRENCES

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION et WATER ENVIRONMENT FEDERATION (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19^e éd. American Public Health Association, Washington, D.C., 1108 p.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS et AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1990). *Water Treatment Plant Design*. 2^e éd. McGraw-Hill Publishing Company, 598 p.

AMIRTHARAJAH, A. et MILLS, K.M. (1982). Rapid-Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation. *Journal of the American Water Works Association*, 74(4), 210-216.

BADER, T.A. (1976). Water Reuse in 100% Secondary Fibre Pulping Mill. *TAPPI Second Fibers Conference*, Los Angeles, 20-23 septembre 1976, pp. 31-35.

BISHOP, S.L. et CICHON, E.J. (1984). Upflow Clarification of New England Surface Water Supplies. *Journal of the New England Water Works Association*, 98(3), 215-236.

CAILLEAUX, C., PUJOL, E., DE DIANOUS, F. et DRUOTON, J.C. (1992). Study of Weighted Flocculation in View of a New Type of Clarifier. *Aqua*, 41(1), 18-27.

DAUTHUILLE, P. (1988). Le DENSADEG : un nouveau décanteur à hautes performances. *Techniques, Sciences, Méthodes : génie urbain et génie rural*, 88(2), 63-72.

DESJARDINS, R. (1990). *Le traitement des eaux*. 2^e éd. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 304 p.

ECKENFELDER, W.W. (1982). *Gestion des eaux usées urbaines et industrielles*. Technique & Documentation Lavoisier, Paris, 503 p.

EISENREICH, S.J. et ARMSTRONG, D.E. (1978). Adsorption of Inorganic and Organic Phosphorus by Amorphous Aluminum Hydroxide. *Journal of Environmental Science and Health*, partie A, A13(5-6), 337-364.

EVERS, R.H. (1973). Advanced Wastewater Treatment Techniques for Removing Nitrogen and Phosphorus. *Water and Sewage Works*, Reference Number : 15-19, 134-137.

FICQUETTE, B.N. (1981). *Color Removal from Groundwater by Ion Exchange and Sludge Recycle Techniques*. Mémoire de maîtrise, Mississippi State University, Water Resources Research Institute, États-Unis, 131 p.

GUPTA, K.B. et HAM, R.K. (1983). *An Evaluation of Effects and Interaction of Variables on a Solids-Liquid Separation Process With and Without Using Recycled Floccs*. American Institute of Chemical Engineers, National Meeting. New York, 30 p.

IGNATENKO, A.P. (1982). Improving the Thickening of Hydroxide Sludges by Using Solid Phase Coagulation. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*, 55(10), 2262-2266.

JENKINS, D., FERGUSON, J.F. et MENAR, A.B. (1971). Chemical Processes for Phosphate Removal. *Water Research*, 5(7), 369-389.

KHAMSKII, E.V. (1969). *Crystallization from Solutions*. Consultants Bureau, New York, 106 p.

LANHAM, R.M., TSAI, K.-C. et HUBBS, S.A. (1984). *Recycling of Preformed Alum*

Sludge in the Coagulation Process. Proceedings - American Water Works Association Annual Conference 1984, Denver, CO., pp. 491-506.

LAVOIE, J-Y. et MELOCHE, F. (1993). Valorisation des boues d'alun d'une usine de traitement d'eau potable pour le traitement des eaux usées. *Sciences et techniques de l'eau*, 26(2), 111-118.

LEFORT, M. (1995). *Enlèvement du phosphore filtrable des eaux usées par l'intégration de la recirculation des boues chimiques au procédé de coagulation-floculation*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada, 96 p.

METCALF & EDDY, INC. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. 3^e éd. McGraw-Hill, Inc., Boston, 1334 p.

MONETTE, F., BRIÈRE, F.G., LÉTOURNEAU, M., DUCHESNE, M. et HAUSLER, R. (1999a). Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : performance générale et stabilité du procédé. Soumis le 27 avril 1999 à la *Revue canadienne de génie civil*, 53 p.

MONETTE, F., BRIÈRE, F.G., LÉTOURNEAU, M., DUCHESNE, M. et HAUSLER, R. (1999b). Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : influence des réactifs. Soumis le 27 avril 1999 à la *Revue canadienne de génie civil*, 54 p.

MONETTE, F., BRIÈRE, F.G., LÉTOURNEAU, M., DUCHESNE, M. et HAUSLER, R. (1999c). Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : évaluation et validation à grande échelle. Soumis le 27 avril 1999 à la *Revue canadienne de génie civil*, 64 p.

MONTEITH, H.D. et BALDWIN, W.W. (1974). *Phosphate Removal Using Waste Alum Sludge from Water Purification*. Royal Military College of Canada, Civil Engineering Research Report CE 74-1, 76 p.

O'BLENIS, J.D. et WARRINER, T.R. (1972). *The Effects of Aluminum Sludge from Water Purification on Municipal Primary Sewage Treatment*. Royal Military College of Canada, Civil Engineering Research Report CE 72-5, 72 p.

PALLO, P.E., SCHWARTZ, B.J. et WANG, L.K. (1972). Recycling and Reuse of Filter Backwash Water Containing Alum Sludge. *Water & Sewage Works*, 119(5), 123-125.

SNOEYINK, V.L. et JENKINS, D. (1980). *Water Chemistry*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 463 p.

STEPKO, W.E. (1976). *Phosphorus Removal Demonstration Studies at C.F.B. Trenton, Phase II (Alum Addition Optimization)*. Technology Development Report EPS 4-WP-76-4 (Environmental Protection Service), 33 p.

STUMM, W. et MORGAN, J.J. (1962). Chemical Aspects of Coagulation. *Journal of American Water Works Association*, 54(8), 971-992.

STUMM, W. et MORGAN, J.J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. 3^e éd. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1022 p.

TARDAT-HENRY, M. (1989). Évolution des dérivés de l'aluminium utilisés comme agents coagulants. *Sciences et techniques de l'eau*, 22(4), 297-304.

THOMAS, E.A. (1972). Phosphate Removal by Recirculating Iron Sludge. *Journal of the*

Water Pollution and Control Federation, 44(2), 176-182.

VAINSHTEIN, I.A., BABANINA, A.I., KUDENKO, G.A. et SHEMETOVA, T.M. (1988). Thickening of Heavy Metal Hydroxide Sludges. *Soviet Journal of Water Chemistry and Technology*, 10(5), 89-93.

VESILIND, P.A. (1988). Capillary Suction Time as a Fundamental Measure of Sludge Dewaterability. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 60(2), 215-220.

WILSON, T.E., BIZZARRI, R.E., BURKE, T., LANGDON, P.E.Jr. et COURSON, C.M. (1975). Upgrading Primary Treatment with Chemicals and Water Treatment Sludge. *Journal of the Water Pollution and Control Federation*, 47(12), 2820-2833.

ANNEXES

ANNEXE I

Article 1

Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : performance générale et stabilité du procédé

Auteurs : Frédéric MONETTE^a

François G. BRIÈRE^a

Michel LÉTOURNEAU^b

Marc DUCHESNE^c

Robert HAUSLER^c

Adresse des auteurs :

^a Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal,
Case postale 6079, succursale Centre-Ville, Montréal (Québec), H3C 3A7, Canada.

^b Groupe-conseil Génivar inc., 5355, boulevard des Gradins, Québec (Québec), G2J 1C8,
Canada.

^c Station expérimentale des procédés pilotes en environnement (STEPPE), Université
du Québec à Montréal, Case postale 8888, succursale Centre-Ville, Montréal (Québec),
H3C 3P8, Canada.

Article 1 soumis le 27 avril 1999 à la *Revue canadienne de génie civil*.

Résumé : Six séries d'essais ont été réalisées afin d'acquérir des connaissances sur la stabilité et la performance d'un procédé de coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques urbaines. Ils ont consisté en des recirculations séquentielles à même des réacteurs pilotes (100 litres). D'autres essais ont porté sur l'évolution de la stabilité suite à des variations de charges de l'eau brute. L'analyse des résultats a révélé que la stabilité est atteinte dès les premiers cycles de recirculation. Afin de bénéficier de meilleurs rendements par rapport à un système classique, la concentration d'adjuvant de floculation doit être augmentée proportionnellement à la masse de boues recirculées. Les résultats ont également démontré que la recirculation ne contribue pas à absorber les variations de charges de l'eau brute. Ainsi, la mise en route à grande échelle du procédé n'impliquerait pas de risques de dégradation de l'effluent ou de modifications majeures quant à son opération. Les mécanismes prédominants de coagulation-floculation identifiés, menant à une amélioration des rendements par rapport à un système classique, sont l'entrappage et le balayage. Finalement, les boues générées se conditionneraient et se déshydrateraient de manière comparable aux boues classiques.

Mots clefs : Recirculation, boues, floccs préformés, coagulation-floculation, traitement, eau usée, stabilité.

Abstract: Six series of tests were carried out in order to have a better understanding of the stability and efficiency of a coagulation-flocculation process with chemical sludge recycling. The tests consisted in sequential sludge recycling in 100-liter pilot reactors. Other tests were performed to examine the stability following wastewater loading variations. Results showed that stability was reached immediately during the first recycling sequences. Furthermore, in order to obtain improved results compared to those of a classical coagulation-flocculation process, the flocculant concentration must be increased according to the sludge recycling load. Results also revealed that recycling sludge does not absorb wastewater load variations. Consequently, the implementation of sludge recycling in a wastewater treatment plant would not cause effluent degradation or entail major changes in a normal plant operation routine. The predominant coagulation-flocculation mechanisms that explained the increase in efficiency, in comparison with the classical process, were identified as enmeshment and sweep flocculation. Finally, the recycled sludge produced could be conditioned and dewatered in a fashion similar to that of a classical process.

Key-Words: Recycling, sludge, preformed flocs, coagulation-flocculation, treatment, wastewater, stability.

1. INTRODUCTION

De nombreuses stations de traitement des eaux usées utilisent le procédé de coagulation-floculation pour limiter le rejet de certains polluants (phosphore total, MES, DBO₅, etc.) au cours d'eau récepteur. Ce procédé implique le plus souvent la dispersion instantanée d'un sel métallique trivalent, Al(III) ou Fe(III), qui déstabilise les particules colloïdales et mène à la formation de micro-flocs. Le pontage de ces micro-flocs, grâce à l'ajout d'un adjuvant de floculation (généralement de type anionique), en font des flocons plus denses et plus volumineux. La coagulation-floculation s'accompagne également d'autres mécanismes tels que la précipitation chimique, la complexation, l'adsorption à la surface des flocons, l'entrappage ainsi que le balayage. Une simple décantation permet ensuite l'élimination des flocons formés.

Dans le but de réduire la quantité et le coût des produits chimiques nécessaires au traitement, plusieurs auteurs ont étudié la possibilité de recirculer une partie des boues chimiques produites (flocs préformés). Cette recirculation permettrait d'exploiter à la fois le pouvoir coagulant résiduel de la boue et sa capacité d'adsorption tout en fournissant une concentration élevée de noyaux initiateurs de coagulation. De plus, elle favoriserait une amélioration des rendements épuratoires.

1.1. REVUE DE LA DOCUMENTATION SCIENTIFIQUE

Selon Khamiskii (1969), une augmentation de la taille des particules (cristaux) peut être obtenue en introduisant des cristaux préalablement formés dans la solution à traiter. La matière présente en

solution semble être précipitée ou adsorbée de manière préférentielle par les cristaux préformés, qui serviraient de germes initiateurs de cristallisation ou de précipitation. Les travaux de Jenkins *et al.* (1971) ont également montré que l'ajout de cristaux permettait d'initier rapidement la précipitation du phosphate de calcium et d'éliminer la période d'induction précédant normalement la nucléation du précipité. D'autres essais menés par Bader (1976) pour une teinturerie au Wisconsin (États-Unis) ont confirmé l'efficacité de réutiliser la boue comme noyau de floculation. Cette modification au procédé existant a permis d'accroître l'efficacité d'enlèvement de la teinture tout en produisant des floes plus lourds qui décantent mieux. Par ailleurs, la théorie relative à la floculation orthocinétique précise que le taux de diminution des particules en suspension augmente en fonction du cube du diamètre des particules formées lors de la coagulation et du nombre de particules (Desjardins, 1990). Cette théorie viendrait donc appuyer la thèse selon laquelle le procédé de coagulation-floculation serait amélioré lorsque des floes préformés (boue) sont recirculés.

Lanham *et al.* (1984) ont procédé à des essais sur une eau de rivière prédécantée en vue de vérifier le potentiel des boues d'alun (eau potable) comme aide-coagulant. Les essais réalisés en béchers ont servi à identifier le meilleur lieu d'introduction de la boue dans le procédé de coagulation-floculation et à optimiser la quantité à ajouter. Les analyses de turbidité ont permis de conclure que l'ajout de boues avant plutôt qu'après l'injection d'alun menait à une amélioration significative de l'efficacité de traitement. Les auteurs précisent que l'introduction de boue au procédé favorise les contacts entre les particules et leur agrégation. Les essais ont également révélé que la recirculation d'environ 1 000 mg-MES de boues par litre d'eau à traiter permettait de réaliser une économie de 40% de coagulant.

D'après O'Brien et Warriner (1972), bien que les processus exacts impliqués lors de l'enlèvement des phosphates soient mal connus, l'adsorption est le mécanisme prédominant lors de l'enlèvement des phosphates par les boues de traitement des eaux. De leur côté, Eisenreich et Armstrong (1978) ont démontré, à l'aide d'essais en laboratoire avec des solutions reconstituées, que les hydroxydes d'aluminium amorphes adsorbaient aisément le phosphore organique et inorganique. D'ailleurs, les isothermes d'adsorption tracés respectaient bien le modèle classique de Langmuir. Lefort (1995) a tiré des conclusions similaires lors d'essais de captage du phosphore filtrable (eau usée) en présence de boues ferriques d'origine urbaine.

En Russie, la recirculation de boues a également été employée pour tenter d'épaissir les précipités d'hydroxyde formés lors de l'enlèvement de métaux lourds provenant d'effluents industriels. Ces précipités forment une dispersion fine et captent une grande quantité d'eau lors de leur floculation, produisant des floccs volumineux. La recirculation des floccs modifie la formation de la phase solide et engendre des floccs de dimensions plus importantes ainsi qu'une teneur en eau plus faible dans les boues générées (Ignatenko, 1982; Vainshtein et *al.*, 1988).

Enfin, Thomas (1972) a démontré que l'utilisation de la capacité adsorbantes de la boue ferrique, produite lors de la précipitation des phosphates en eau usée, améliorait l'enlèvement de ces derniers. D'autres essais, réalisés dans deux cuves à une échelle plus importante, ont assuré des économies de 50% à 66% du chlorure ferrique employé. Les essais ont simplement consisté à produire une boue dans l'une des deux cuves par coagulation-floculation classique (sans recirculation) puis à la réutiliser dans la seconde cuve lors du traitement.

1.2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Plusieurs travaux ont démontré l'intérêt de la recirculation ou de la réutilisation de boues. Très peu d'études ont toutefois impliqué des boues chimiques issues d'un traitement des eaux usées. La problématique liée à l'initiation de la coagulation ne se présente pas de la même manière en eau usée puisque cette eau possède déjà une concentration importante de noyaux. Par ailleurs, peu d'essais comparent un procédé de coagulation-floculation classique avec celui intégrant une recirculation de boues chimiques urbaines à base de fer ou d'aluminium. De plus, l'étude en conditions contrôlées de la stabilité d'un tel processus de traitement n'a aucunement été abordée.

Par conséquent, le premier objectif de cette étude consiste à acquérir, à une échelle pilote, des connaissances sur l'efficacité de traitement et sur la stabilité de fonctionnement d'un procédé de coagulation-floculation d'eaux usées urbaines avec recirculation de boues ferriques et alumiques. Elle vise également à mieux comprendre les mécanismes de coagulation et de floculation mis en jeu lors de la recirculation de boues chimiques. La déshydratabilité des boues issues du procédé de recirculation est également brièvement examinée.

Le second objectif de cette étude consiste à étudier les conséquences de perturbations dues aux variations de charges (phosphore total, MES, etc.) de l'eau usée sur la stabilité du traitement par coagulation-floculation avec recirculation de boues alumiques. Les connaissances acquises permettront de mieux prévoir les effets d'une perturbation à une plus grande échelle.

L'étude, réalisée à l'échelle pilote, visait l'utilisation des résultats à une station d'épuration existante, soit le *Centre d'épuration Rive-Sud* (CÉRS) localisé à Longueuil (Québec, Canada). Cette station, de type physico-chimique, peut retourner, tout juste en amont des flocculateurs, une partie des boues produites aux décanteurs. La boue est alors ajoutée après le coagulant, mais avant l'adjuvant de floculation. Pour cette raison, les premières séries d'essais ont été effectuées selon les séquences d'introduction des réactifs du CÉRS, malgré le fait que la documentation scientifique (Lanham *et al.* 1984) précise l'effet bénéfique d'une recirculation avant l'injection du coagulant. Toutefois, lors des essais visant l'étude des conditions de stabilité après perturbations, la boue a été introduite avant l'ajout des réactifs chimiques.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. GÉNÉRALITÉS

Les essais de coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques ont été réalisés avec des eaux usées dégrillées et dessablées, prélevées au CÉRS. Les coagulants utilisés lors de cette étude sont les deux plus usuels dans le domaine de l'épuration des eaux, soit l'alun $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$ et le chlorure ferrique (FeCl_3). Ils ont été injectés dans leur forme commerciale, sans dilution préalable, et conjointement avec un adjuvant de floculation de type anionique, le *Percol 902* (*Allied Colloids*). Un conditionneur cationique, le *Percol 757* d'*Allied Colloids*, a été utilisés lors des tests de conditionnement et de déshydratation de boues.

2.2. ÉQUIPEMENTS

Les expériences ont été conduites dans des réacteurs séquentiels en cuvette de 100 L de capacité. Le montage expérimental consistait essentiellement en trois colonnes de coagulation-floculation identiques en acrylique de 3,66 m de hauteur et de 0,20 m de diamètre interne et en un réservoir de stockage d'eau usée de 2 500 L équipé d'un système d'agitation. Chacune des colonnes était munie d'un agitateur à vitesse variable (actionnant une tige équipée de cinq pales plates de 5 cm x 10 cm), de trois vannes solénoïdes de prélèvement ainsi que de deux sites d'injection de produits chimiques. L'utilisation des trois colonnes a permis de décaler le début de chaque essai de manière à permettre la formation de la boue nécessaire aux recirculations subséquentes. La figure 1 illustre l'une des colonnes d'essais.

2.3. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL ET ESSAIS DE RECIRCULATION

Le protocole expérimental a été élaboré de manière à favoriser une bonne mise en oeuvre de la coagulation-floculation tout en respectant certaines contraintes physiques liées aux équipements (production limitée de boues). Des essais préliminaires ont servi à préciser les durées de décantation, les concentrations de réactifs (coagulants, adjuvant de floculation) et les taux de recirculation. Les principales phases du protocole expérimental ainsi que le détail des activités correspondantes sont présentés au tableau 1. Tous les essais ont été effectués avec des eaux usées stabilisées à la température ambiante du laboratoire, soit environ 22°C. Les gradients de vitesse (G) indiqués ont été estimés d'après Metcalf & Eddy (1991).

Au total, six séries d'essais ont été complétées (I, II, III, IV, VA et VB). Les quatre premières ont porté sur l'étude de la stabilité de fonctionnement d'un procédé de coagulation-floculation avec recirculation ferriques ou alumiques. La figure 2 présente l'organigramme des essais de recirculation réalisés. Les séries I et II concernaient le chlorure ferrique et la recirculation des boues ferriques pour deux taux de recirculation (TR)¹, soit 100% et 50%. Les séries III et IV se rapportaient à l'étude de l'alun et de la recirculation de la boue alumique pour les mêmes taux de recirculation. Lors des quatre séries d'essais, les concentrations de coagulants ajoutées ont été fixées à $7,9 \times 10^{-5}$ mol/L. La concentration d'adjuvant de floculation (*Percol 902*) a été arrêtée à 0,35 mg/L pour l'ensemble des essais, avec ou sans recirculation, sauf lors des cycles finaux de chacune des quatre séquences de recirculation alors que la concentration a été augmentée proportionnellement à la masse de boues recirculées.

Deux autres séries d'essais pilotes (séries VA et VB) concernaient l'étude des conditions de stabilité après perturbations (figure 3). Suite aux résultats obtenus lors des premières séries d'essais (séries I, II, III et IV), le nombre de cycles de recirculation, après chacune des perturbations, a été limité à trois ou quatre selon le cas. L'eau brute reçue, considérée comme fortement chargée, a ensuite été diluée à deux reprises afin de créer des eaux de moyenne et de faible charges. Les concentrations de coagulant et d'adjuvant de floculation ont été respectivement de 2,40 mg-Al³⁺/L et 0,70 mg/L. Puisque cette phase visait l'étude des conséquences d'une perturbation et non l'importance de l'ajout d'un réactif, la concentration d'adjuvant de floculation a été choisie de manière à ce qu'elle ne limite

1. Le taux de recirculation (TR) correspond au pourcentage de la masse de boues produites par une coagulation-floculation classique qui est recirculé. À titre d'exemple, un taux de 50% signifie que 50% de la masse de boues générée par une coagulation-floculation classique est recirculée lors de l'essai subséquent. Ces taux ont également été exprimés en mg-MES/L.

pas le bon fonctionnement du procédé. Le taux de recirculation adopté visait un équivalent de 200 mg-MES/L.

Enfin, lors de chacune des six séries d'expériences, des essais témoins de coagulation-floculation ont également été réalisés sans recirculation de boue. Ils ont permis de générer la boue pour les recirculations subséquentes en plus d'assurer une comparaison des rendements.

2.4. MÉTHODES ANALYTIQUES

Toutes les analyses ont été conduites selon les méthodes normalisées indiquées au manuel *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al. 1995). Les analyses des MES et des paramètres filtrables ont été réalisées avec des membranes en fibre de verre 934-AH de *Whatman* d'une porosité de 1,5 μm . Les métaux ont été analysés par un système d'atomisation par tube graphite de marque *VARIAN* (modèle *GTA-95*) après digestion des échantillons à l'acide nitrique.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. CONDITIONS DE STABILITÉ DU PROCÉDÉ (SÉRIES I, II, III ET IV)

3.1.1. Conditions de stabilité La figure 4 illustre, pour le chlorure ferrique, les résultats de MES et de phosphore total pour les deux taux de recirculation étudiés. Seulement les moyennes des prises

d'échantillonnage 1 et 2 sont présentées. En guise de comparaison, les moyennes des essais témoins (coagulation-floculation classique) y sont également indiquées.

L'analyse des résultats de qualité d'eau traitée (figures 4a et 4b) révèle que les conditions de stabilité sont atteintes dès les premiers cycles peu importe le taux de recirculation considéré. Aucune détérioration évidente de la qualité de l'eau traitée n'est apparue suite aux cycles de recirculation. Cette stabilité serait, *a priori*, attribuée à la masse de boues recirculées, par rapport à la quantité de polluants à éliminer dans l'eau brute, qui tend à stabiliser le procédé de coagulation-floculation lui-même.

Toutefois, dans le cas des MES, certaines fluctuations sont observées à un taux de recirculation de 100% (série I). Ces fluctuations ne se sont pas révélées de manière aussi nette dans le cas du phosphore total. L'existence de la forme filtrable de phosphore explique la diminution de l'amplitude des variations observées. La figure 5 présente l'allure des courbes obtenues pour les MES et le phosphore total (prises 1, 2 et 3) ainsi que pour le fer total (prise 2). La figure 5a (MES) montre les fluctuations importantes à la prise 3 par rapport à la prise 2. Une décantation parfois déficiente des flocs formés serait à l'origine des variations observées. Ce résultat est également confirmé par les variations de fer total à la prise 2 (figure 5c). Le fer total est fortement associé aux flocs résiduels dans l'eau traitée. Tel que prévu, les fluctuations de MES et de fer total suivent peu celles du phosphore total (figure 5b).

Les difficultés liées à une décantation parfois déficiente des flocs formés pourraient être attribuées

à une dispersion insuffisante de la boue (une seule minute) avant l'ajout d'adjuvant de floculation.

Trois hypothèses expliqueraient les problèmes reliés à la décantation :

- l'efficacité de l'adjuvant de floculation serait extrêmement sensible à la quantité initiale de boues avec laquelle il entre en contact. Les actions chimiques et physiques du polyélectrolyte utilisé (*Percol 902*) nécessitent sa dispersion efficace dans la masse de liquide et, surtout, une mise en contact initiale avec la totalité des solides présents (micro-flocs formés avec le coagulant et la boue recirculée). Le degré de dispersion de la boue recirculée, qui est directement relié à la durée du mélange, influencerait donc l'efficacité de l'adjuvant de floculation et, par conséquent, la décantation des flocs ainsi que la stabilité du procédé;
- le coagulant injecté, avant l'ajout de boues, jouerait un rôle essentiel dans l'efficacité du procédé. Selon Thomas (1972), le coagulant, injecté avant la boue, «réactiverait» celui contenu dans la boue. Ainsi, un degré insuffisant de dispersion de la boue limiterait l'action du coagulant sur cette dernière, ce qui mènerait à certaines instabilités de traitement. Par ailleurs, sans que le phénomène de «réactivation» soit précisé par cet auteur, on peut avancer que le coagulant serait initialement consommé par les charges polluantes présentes dans l'eau brute (formation de micro-flocs), notamment au bas de la colonne, ce qui entraînerait une réactivation inefficace du coagulant contenu dans la boue. L'efficacité du coagulant présent dans la boue pour épurer les eaux usées serait donc limitée;
- le niveau de contrôle de la procédure expérimentale d'essais serait insuffisant. Cette situation mènerait à une décantation parfois inefficace et à certaines instabilités de traitement.

Suite à l'obtention de ces résultats et à certains essais de dispersion de boues et de traceur (non présentés), la période de dispersion de la boue, avant injection de l'adjuvant de floculation, a été augmentée à deux minutes lors des trois essais subséquents (séries II, III et IV). Les résultats obtenus lors de la série II, illustrés à la figures 4, tendent à confirmer l'effet bénéfique de ce changement sur la stabilité du procédé. La première hypothèse est, *a priori*, la plus plausible. La période de dispersion de la boue (avant son contact avec l'adjuvant de floculation) et son mécanisme de dispersion constitueraient donc des paramètres critiques à surveiller et à contrôler à l'échelle d'une station d'épuration. Cette période a été subséquemment augmentée à deux minutes.

Par ailleurs, l'analyse globale des résultats montre que la qualité de l'eau traitée obtenue lors des recirculations de boues ferriques ne s'est pas dégradée en fonction du nombre de cycles complétés. Cette observation est importante en raison de la maturation (digestion) et de l'altération (bris des floes) possible de la boue avec le temps. Le renouvellement rapide de la boue par d'autres fraîchement formées minimise les impacts sur les rendements épuratoires. L'âge de la boue n'est donc pas un paramètre critique à surveiller lorsqu'une boue est recirculée assez rapidement après sa formation (quelques heures).

En ce qui concerne la recirculation de la boue alumique, la figure 6 présente les résultats de MES et de phosphore total (moyennes des prises 1 et 2) obtenus pour les deux taux de recirculation étudiés. L'analyse des résultats révèle, tout comme pour le chlorure ferrique, que les conditions de stabilité sont atteintes dès les premiers cycles. Aucune fluctuation, comme celles observées pour les MES avec le chlorure ferrique (figure 4a), n'a été observée pour les deux taux de recirculation étudiés.

L'augmentation de la durée de dispersion de la boue à deux minutes aurait permis de stabiliser l'efficacité de traitement. Par ailleurs, aucune dégradation de la qualité de l'eau traitée n'a été observée en fonction du nombre de cycles réalisés. Le renouvellement rapide de la boue par d'autres fraîchement formées minimise, encore une fois, les impacts sur les rendements épuratoires.

Transposés à une échelle plus importante, les résultats obtenus signifient que la mise en route instantanée d'un tel procédé ne devrait pas impliquer de difficultés apparentes à la condition de limiter le temps de séjour des boues dans le système. La qualité de l'eau traitée devrait demeurer la même avec ou sans recirculation. De plus, puisque les boues produites sont remplacées rapidement par d'autres fraîchement formées, leurs caractéristiques devraient être comparables à celles d'un procédé classique. Dans ces conditions, la mise en oeuvre de la déshydratation ne risque pas d'être perturbée. Toutefois, certaines difficultés liées au mode opératoire d'une station pourraient venir diminuer la stabilité du procédé. Entre autres, une longue période de stockage des boues, dans les fosses des décanteurs, dans les épaisseurs ou tout autre bassin avant leur recirculation, peut mener à leur maturation et causer indirectement des déséquilibres de fonctionnement. Dans le cas de la boue ferrique, cet aspect est plus important puisque sa digestion peut favoriser la réduction du Fe(III) en Fe(II) , lequel est soluble et peu efficace en tant qu'agent coagulant. Cet aspect devra être surveillé dans le cas d'une application du procédé à grande échelle.

3.1.2. Effet du taux de recirculation des boues L'effet du taux de recirculation sur la performance du procédé est difficile à réaliser dans le cas de la recirculation de la boue ferrique puisque les séries d'essais I et II ont été conduites avec deux eaux brutes de caractéristiques

différentes. Néanmoins, une analyse sommaire peut être faite. L'examen comparatif des courbes de la figure 4b révèle des valeurs résiduelles de phosphore total comparables pour les deux taux de recirculation. Puisque la qualité de l'eau traitée par coagulation-floculation dépend généralement des caractéristiques des eaux brutes, qui elles-mêmes varient d'un prélèvement à l'autre, le hasard pourrait expliquer ces résultats. D'un autre côté, la masse importante des boues recirculées, par rapport à la concentration initiale de phosphore total dans l'eau brute, peut également avoir contribué à une stabilisation du procédé de coagulation-floculation. En d'autres mots, la qualité de l'eau traitée serait assez indépendante de celle de l'eau brute lorsqu'une boue est recirculée. Dans le cas des MES, la figure 4a montre des valeurs résiduelles légèrement supérieures lorsque le taux de recirculation atteint 100%. Ainsi, l'effet stabilisateur de la recirculation pourrait ne pas être aussi prédominant que le laisserait croire les résultats de phosphore total.

En raison des caractéristiques différentes des eaux brutes employées lors des essais, une étude sommaire des rapports «Fe consommé/Ptotal éliminé» et «Fe consommé/MES éliminé» a également été effectuée afin de comparer les résultats. Compte tenu des données disponibles, ces rapports ont pu être calculés uniquement pour la prise 2. Le tableau 2 présente les rapports calculés pour les deux taux de recirculation ainsi que pour les essais témoins. La masse de fer ajouté par la recirculation de la boue ferrique n'a pas été pris en considération lors des bilans massiques (équations [1] et [2]).

$$[1] \quad \frac{Fe \text{ consommé}}{P_{total} \text{ éliminé}} = \frac{(Fe \text{ eau brute} + Fe \text{ ajouté} - Fe \text{ eau traitée}) \text{ mg-Fe/L} \times 100 \text{ L}}{(P_{total} \text{ eau brute} - P_{total} \text{ eau traitée}) \text{ mg-P/L} \times 100 \text{ L}}$$

$$[2] \quad \frac{Fe \text{ consommé}}{MES \text{ éliminées}} = \frac{(Fe \text{ eau brute} + Fe \text{ ajouté} - Fe \text{ eau traitée}) \text{ mg-Fe/L} \times 100 \text{ L}}{(MES \text{ eau brute} - MES \text{ eau traitée}) \text{ mg-MES/L} \times 100 \text{ L}}$$

Les résultats du tableau 2 révèlent que plus le taux de recirculation est faible, plus l'efficacité du coagulant est élevée. Ces résultats doivent néanmoins être interprétés avec circonspection. En effet, un abaissement de la charge polluante de l'eau brute implique généralement une perte d'efficacité relative du coagulant pour éliminer une masse égale de polluant. Pour la série d'essais conduite à un taux de recirculation de 100%, la charge de l'eau brute en phosphore total et en MES a été près de 30% inférieure à celle correspondante au taux de 50%. Cette différence, sans être très grande, explique en bonne partie les écarts de valeurs observés entre les rapports massiques calculés pour les deux taux de recirculation étudiés. Les résultats des essais témoins (tableau 2) témoignent également de l'effet de la charge polluante de l'eau brute sur la consommation de coagulant. Les résultats des essais témoins permettent d'ailleurs d'en témoigner.

Dans le cas des essais de recirculation de la boue alumique, l'analyse comparative des courbes des figures 6a et 6b révèle que le taux de recirculation exerce peu d'influence sur la qualité de l'eau traitée. Tant pour les MES que pour le phosphore total, les rendements obtenus lors des cycles de recirculation (moyenne des prises 1 et 2) sont relativement indépendants des taux de recirculation de boues considérés. Ce résultat démontre que l'ajout d'une quantité plus ou moins importante de boue (taux 50% : 60 mg-MES/L; taux 100% : 120 mg-MES/L) n'entrave pas l'efficacité de la coagulation-floculation.

Pratiquement, le degré de contrôle du flux massique de recirculation de boues dans une station d'épuration ne devrait pas être tributaire des rendements épuratoires. En effet, un contrôle imparfait du flux massique ne contribue pas à des déséquilibres de fonctionnement significatifs. Par ailleurs,

les résultats de recirculation de boues ferriques (MES) démontrent qu'une variation de charge de l'eau brute peut avoir certains impacts sur la qualité des eaux traitées. La masse de boues recirculées, par rapport à une variation des caractéristiques de l'eau brute, n'assure pas la stabilisation du procédé de coagulation-floculation. Le nombre d'essais comparatifs étant très limité, ces conclusions doivent pour l'instant être considérées comme préliminaire.

3.1.3. Performance du procédé de recirculation de boues Les figures 7 et 8 illustrent, pour chacune des trois prises d'échantillonnage 1, 2 et 3, les abattements moyens obtenus pour le phosphore total et filtrable, les MES ainsi que les consommations d'alcalinité. Les résultats sont regroupés de manière à pouvoir comparer directement la moyenne des cycles de recirculation (excluant le dernier cycle) avec les moyennes obtenues pour les essais témoins (sans recirculation) et le dernier cycle des séquences de recirculation avec augmentation de la concentration en adjuvant de floculation. D'abord, l'analyse globale des résultats obtenus pour les prises 1 et 2 avec l'alun démontre que la qualité de l'eau traitée avec recirculation est comparable à celle obtenue avec les essais témoins sans recirculation. Ces résultats ont été vérifiés quel que soit le taux de recirculation considéré. Quant à la prise 3, elle a présenté des résultats nettement moins favorables, notamment dans le cas du phosphore total et des MES. Des tendances similaires ont été observées à un taux de 100% avec le chlorure ferrique et la recirculation de sa boue, quoique la dégradation de l'eau traitée à la prise 3 (par rapport aux deux autres prises) ne soit pas aussi importante qu'avec l'alun. Cette tendance n'a pas été aussi nette lorsque le taux de recirculation de boues ferriques a été de 50%. En effet, les résultats obtenus à la prise 3 approchaient ceux observés à la prise 2.

Les rendements épuratoires moins élevés observés à la prise 3, plus particulièrement avec l'alun, sont *a priori* reliés à une décantation moins rapide des floccs. À ce sujet, plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- turbulences hydrauliques occasionnées par la concentration élevée de floccs au bas de la colonne (fortement associées au taux de recirculation);
- déficience en adjuvant de floculation;
- mauvaises caractéristiques des floccs (densité, taille).

Compte tenu des résultats obtenus à la prise 3 avec l'augmentation de la concentration d'adjuvant de floculation au dernier cycle, la seconde hypothèse s'avère la plus plausible. La déficience en adjuvant de floculation affecte d'ailleurs directement les caractéristiques intrinsèques des floccs (troisième hypothèse) et l'intensité des turbulences hydrauliques (première hypothèse).

Dans l'ensemble, les bonnes performances obtenues aux prises d'échantillonnage 1 et 2 sont d'autant plus intéressantes que les quantités de produits chimiques injectés (coagulant et adjuvant de floculation) et le taux de recirculation n'ont pas été optimisés. Par conséquent, des rendements supérieurs pourraient être atteints. À cet égard, les taux de recirculation étudiés ont été plus faibles que celui jugé optimal par Lanham *et al.* (1984), soit 1 000 mg-MES/L. En effet, durant les cycles de recirculation, l'augmentation de la concentration en MES des eaux brutes a été respectivement de 70 mg/L, 55 mg/L, 120 mg/L et 60 mg/L pour les séries d'essais I, II, III et IV. Toutefois, les travaux de Lanham *et al.* ont tous été menés avec des boues d'eau potable ce qui en rend la

comparaison difficile. De plus, l'utilisation d'un tel taux de recirculation à l'échelle d'une station d'épuration risque de conduire à des flux massiques de boues recirculées trop importants et, par conséquent, à des difficultés opérationnelles (engorgement des équipements, digestion de la boue, septicité, etc.). Dans la même perspective, comme le démontre les résultats à la prise 3, la concentration d'adjuvant de floculation devra nécessairement être rehaussée en fonction de l'augmentation du taux de recirculation. Un bon compromis entre les concentrations de boues recirculées et d'adjuvant de floculation doit être recherché.

Par ailleurs, le lieu d'introduction de la boue dans la séquence de traitement n'a pas été examiné spécifiquement à cette phase. Le choix d'introduire la boue après le coagulant, mais avant l'adjuvant de floculation, s'est établi en fonction des infrastructures du CÉRS. Selon Lanham *et al.* (1984), la séquence d'introduction des réactifs «boue → coagulant → adjuvant de floculation» est nettement meilleure et a contribué de manière significative à une amélioration des performances. Cependant, le potentiel résiduel du coagulant présent dans une boue d'eau potable s'avère certainement différent de celui d'une boue d'eau usée urbaine, en raison de leur nature même (matières organiques, solides, phosphore, etc.). À cet égard, les résultats obtenus aux prises 1 et 2 ne démontrent pas d'actions chimiques particulières du coagulant présent dans la boue recirculée. En effet, des rendements assez comparables à ceux des essais témoins ont été obtenus.

Plus spécifiquement, l'examen des valeurs moyennes d'abattelements du phosphore filtrable des témoins et des cycles de recirculation (figure 7b) permet de conclure que la boue n'a pas semblé

contribuer de manière significative à son captage². Les tendances ont été relativement semblables à chacune des trois prises. Ce résultat demeure surprenant puisque plusieurs chercheurs ont déjà identifié les propriétés adsorbantes ou fixatives de la boue (Eisenreich et Armstrong 1978; Lefort 1995; O'Brien et Warriner 1972; Thomas 1972). D'un autre côté, bien qu'une certaine élimination du phosphore filtrable ait été anticipé, sa faible concentration dans l'eau usée brute (de l'ordre de 0,8 à 2,2 mg-P/L) ainsi que la masse limitée de boues recirculées laissent peu de place à un processus de captage efficace.

En ce qui concerne l'élimination des MES (figure 8a), plus spécifiquement à la prise 3, les rendements obtenus ont été, comparativement aux autres paramètres, plus sujets à des variations. Leur élimination est directement liée à la vitesse de décantation des floes formés avec ou sans recirculation. Par conséquent, elle est proportionnelle à la taille et à la densité des floes formés, à la viscosité et à la masse volumique de l'eau ainsi qu'à tout autre phénomène lié à la décantation de particules floculantes (interactions entre les floes, turbulence, etc.). Comme la concentration de floes augmente avec le taux de recirculation, surtout dans la partie inférieure de la colonne, l'augmentation des MES mesurées aux échantillons prélevés à la prise 3 n'est pas surprenante.

Enfin, en ce qui a trait aux résultats d'alcalinité, la figure 8b révèle des consommations légèrement supérieures lorsqu'une boue est recirculée, notamment lorsque la concentration d'adjuvant de floculation est augmentée (dernier cycle). À titre comparatif, les attentes théoriques de

2. Les mécanismes précis d'élimination de phosphore filtrable par une boue chimique urbaine n'étant pas parfaitement connus, le terme «captage» est employé au sens large pour exprimer les processus d'adsorption, de complexation ou d'échange d'ions.

consommations d'alcalinité (Metcalf & Eddy 1991) se situent aux environs de 12 mg- CaCO_3 pour les concentrations de coagulant injectées (4,41 mg- Fe^{3+} /L et 2,13 mg- Al^{3+} /L). Trois hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce résultat :

- en raison de la présence plus importante de solides (boues recirculées), la réaction du coagulant serait plus complète, ce qui favoriserait une consommation plus importante d'alcalinité;
- le coagulant contenu dans la boue recirculée réagirait à nouveau, consommant ainsi une alcalinité supplémentaire;
- la boue adsorberait des bicarbonates (HCO_3^-), particulièrement lorsque le nombre de contacts «eau : floccs formés» est important, consommant par le fait même une alcalinité additionnelle. Cette adsorption expliquerait les consommations supérieures d'alcalinité en fonction de la profondeur des prises d'échantillonnage (figure 8b). En effet, les contacts avec les floccs formés seraient privilégiés en profondeur durant la période de décantation en raison de la concentration élevée de floccs.

La première hypothèse devrait être liée à une diminution du coagulant présent dans l'eau traitée. L'analyse des résultats de fer ou d'aluminium sous forme filtrable (résultats non-présentés) ne permet pas d'en tirer de conclusion définitive. D'un autre côté, la seconde hypothèse s'avère très plausible bien qu'elle soit difficilement vérifiable. En effet, la concentration élevée de coagulant présent dans une boue chimique devrait, en toute logique, conduire à des post-réactions lors de sa recirculation (réaction plus complète du coagulant). Toutefois, les consommations d'alcalinité étant supérieures lorsque la concentration d'adjuvant de floculation est plus importante, aucune conclusion définitive ne peut être tirées. Quant à la troisième hypothèse, d'autres essais seraient nécessaires afin de

conclure sur cette question.

3.1.4. Influence de la quantité d'adjuvant de floculation ajouté Lors de chacune des séries d'essais, la concentration d'adjuvant de floculation (*Percol 902*) a été augmentée au dernier cycle de recirculation afin d'en vérifier l'effet. Les concentrations ont été proportionnellement ajustées en fonction des taux de recirculation de manière à compenser l'augmentation de la masse de solide entrant dans le système. Ainsi, les concentrations ont été majorées à 0,525 mg/L et 0,70 mg/L pour les taux de recirculation respectifs de 50% et 100%. Les résultats de ces essais sont présentés aux figures 7 et 8.

D'abord, l'analyse des résultats obtenus aux prises 1 et 2 révèle, d'une manière générale pour l'ensemble des essais, des rendements assez comparables quels que soient les paramètres de qualité d'eau considérés. Par ailleurs, des résultats intéressants et prometteurs ont été constatés pour la prise 3. En effet, comparativement aux valeurs des essais témoins (sans compensation d'adjuvant de floculation) et aux cycles de recirculation (sans compensation), les rendements obtenus ont été largement supérieurs, particulièrement pour l'élimination des MES et du phosphore total. Les observations visuelles ont d'ailleurs révélé des tailles de floccs atteignant près de 2 cm et des vitesses de décantation exceptionnellement rapides comparativement à celles observées lors des essais témoins. De plus, en raison de leur taille, ces floccs ont permis l'entrappage d'impuretés ainsi qu'une filtration (balayage) de la partie inférieure de la colonne. Le balayage se remarque par des valeurs de MES inférieures à la prise 3 comparativement à celles obtenues pour les échantillons prélevés aux prises 1 et 2. Aucun essai témoin n'a cependant été réalisé avec un supplément d'adjuvant de

floculation.

3.1.5. Boues générées par recirculation Deux types de tests ont permis de vérifier la facilité avec laquelle une boue peut être déshydratée après conditionnement. Le premier, le test de temps de succion capillaire (TSC), permet de juger de la facilité avec laquelle une boue laisse migrer son eau interstitielle par capillarité sur un filtre (Vesilind 1988). Le second, le test de filtration sous vide, mène au calcul de la résistance spécifique « r » de la boue (Metcalf & Eddy 1991). Les expériences conduites sur chacune des boues ont d'abord consisté en la recherche de la concentration optimale de conditionneur (tests de TSC), puis à la réalisation d'un test de filtration sous vide afin d'évaluer « r » aux conditions optimales trouvées. Étant donné le volume limité de boues recueillies lors d'un essai en colonne, un seul test de filtration sous vide a pu être complété sur chacune des boues.

L'interprétation des valeurs obtenues lors de la réalisation des test de TSC et de filtration sous vide ont permis de tirer les conclusions sommaires suivantes :

- la boue recirculée est aussi facilement déshydratée que la boue générée par coagulation-floculation classique. Les tests de TSC ont révélé des concentrations optimales de conditionneur (*Percol 757*) comparables d'une boue à l'autre. De plus, les valeurs de « r » n'ont pas été significativement différentes (considérant la précision de l'essai);
- la concentration optimale de conditionneur (*Percol 757*) et la valeur de « r » semblent indépendantes du taux de recirculation;
- la concentration optimale de conditionneur (*Percol 757*) obtenue pour les boues générées lors des

essais avec compensation en adjuvant de floculation (derniers cycles des quatre séquences de recirculation) est plus faible que celle obtenue pour les essais témoins et les autres essais de recirculation.

Par ailleurs, des tests de décantation³ réalisés sur chacune des boues recueillies ont aussi révélé des caractéristiques de décantation comparables. Toutefois, les quantités de matières décantables se sont avérées de 12% à 23% inférieures lors des essais réalisés avec compensation en adjuvant de floculation.

En pratique, ces résultats impliquent que le volume de boues générées sera directement proportionnel au taux de recirculation appliqué. Leur comportement à la déshydratation sera également assez similaire à celui d'un procédé de coagulation-floculation classique sauf dans le cas de l'ajout d'une concentration plus élevée d'adjuvant de floculation. Dans ce dernier cas, la décantation de la boue produite sera significativement plus rapide et efficace (avec atteinte de siccité plus élevée) et les concentrations de conditionneur requises seront plus faibles. L'ensemble de ces résultats corroborent ceux obtenus par Ignatenko (1982) et Vainshtein *et al.* (1988) et complètent ceux découlant de l'étude des conditions de stabilité (§ 3.1.1.).

3.2. CONDITIONS DE STABILITÉ APRÈS PERTURBATIONS (SÉRIES VA ET VB)

3.2.1. Réalisation des essais L'objectif de cette phase visait à étudier les conséquences d'une

3. Matières décantables mesurées après 10 minutes dans un cylindre de quatre litres (mL de boues décantées par litre).

perturbation (changement de charge de l'eau brute) sur la stabilité de traitement d'une coagulation-floculation avec recirculation de boues. Elle consistait à simuler, en mode séquentiel (échelle pilote), des variations rencontrées quotidiennement à grande échelle. Les perturbations ont été effectuées selon deux séquences (figure 3) :

séquence 1 (série A) : *charge moyenne* \Rightarrow *charge élevée* \Rightarrow *charge faible*

séquence 2 (série B) : *charge moyenne* \Rightarrow *charge faible* \Rightarrow *charge élevée*

Pour les fins d'expérimentation, l'eau usée brute prélevée au CÉRS a été diluée à deux reprises avec l'eau du robinet afin de créer des eaux de moyenne et de faible charge. Le facteur de dilution choisi a été de 1,75 pour obtenir la charge moyenne et de 2,50 pour atteindre la faible charge (à partir de l'eau avec la charge moyenne). Cette méthodologie n'est pas idéale mais a permis de contourner l'aspect très contraignant d'une utilisation de trois eaux usées fraîches de charges différentes. Par ailleurs, afin de mieux étudier l'impact des perturbations sur le procédé, le contenu en phosphore de l'eau usée brute a été augmentée artificiellement (dopage) par ajout d'un mélange de KH_2PO_4 et K_2HPO_4 afin d'obtenir une concentration totale équivalente de 1,20 mg-P/L. Le tableau 3 présente les caractéristiques des eaux obtenues suite aux différentes dilutions pratiquées et au dopage initial en phosphore.

Par ailleurs, la réalisation de ces deux séries d'essais a nécessité une production préalable de volumes de boues à même les réacteurs séquentiels de coagulation-floculation. Les concentrations d'alun et de *Percol 902* employées lors de ces productions ont été respectivement de 3,38 mg- Al^{3+} /L et

0,35 mg/L, malgré le fait que les essais subséquents ont été conduits avec des concentrations différentes (alun : 2,40 mg- Al^{3+} /L; *Percol 902* : 0,70 mg/L). Bien que cette procédure ne soit pas idéale, elle a facilité la production de boues fraîches non digérées, en quantité suffisante, dans des conditions opérationnelles de laboratoire. Ces boues ont ensuite été injectées lors des différents essais afin de générer un équivalent de près de 200 mg-MES/L. Les taux de purge ont été estimés en considérant une masse de boue générée proportionnelle à la charge de l'eau brute.

3.2.2. Stabilité après perturbations Les figures 9 et 10 présentent les résultats moyens des trois prises des colonnes d'essais relatifs au phosphore total, aux MES, à la demande chimique en oxygène totale (DCO) et au phosphore filtrable suite aux perturbations réalisées (séries A et B). Les résultats des essais témoins obtenus pour chacune des trois eaux brutes (trois charges) y sont également montrés.

L'analyse détaillée des figures 9 et 10 révèle que le procédé de coagulation avec recirculation réagit rapidement à tout changement de charge de l'eau brute. Les variations observées suite aux perturbations collent assez bien avec celles des essais témoins, quoique les valeurs résiduelles des différents paramètres dans l'eau traitée avec recirculation soient en moyenne légèrement inférieures. Ces résultats montrent donc que la recirculation contribue à une amélioration de la qualité de l'eau.

Contrairement à ce qui était anticipé, la masse de boue présente ne contribue pas de manière nette à absorber (tamponner) des variations de charges de l'eau brute. Une comparaison des résultats obtenus pour les séries de perturbations A et B permet de confirmer à nouveau cette tendance. En

effet, les valeurs résiduelles observées se rejoignent pour les eaux de charges équivalentes même si la séquence de perturbations est différente (A étant une séquence image de B ou vice-versa). L'amplitude des variations observées suite aux différents essais montre également des valeurs comparables lorsqu'une perturbation d'une haute charge vers une plus faible charge est réalisée ou de faible charge vers une plus haute. Ces résultats corroborent ceux obtenus antérieurement lors de l'étude des conditions de stabilité (séries I à IV, § 3.1.2.).

Cependant, les effets tampons de la boue étant probablement subtils et difficiles à percevoir, les recirculations R4A/R5A/R6A et R7B/R8B/R9B (notamment pour le phosphore total et les MES) pourraient être considérées comme une manifestation de ce phénomène. Pour ces recirculations, un décalage initial (valeur de R4A comparée à R5A et R6A; valeur de R7B comparée à R8B et R9B) est observé par rapport à celui des témoins. Le phénomène inverse, lors d'un changement d'une charge forte à une charge faible, n'est pas aussi clairement observé. Seul un léger décalage ou retard par rapport aux témoins se révèle dans le cas du phosphore total (valeur de R4B comparée à R5B et R6B) et la DCO totale (valeur de R7A comparée à R8A et R9A). Ce décalage peut également se deviner dans le cas des MES en comparant la valeur R4B avec R5B et R6B.

Dans le cas du phosphore filtrable, l'analyse des résultats révèle des tendances similaires. Les écarts observés entre les valeurs des recirculations et celles des témoins sont faibles, même parfois inexistantes. Seule la recirculation R7B se distingue clairement par un décalage, par rapport à R8B, R9B et R10B, laissant croire à un léger effet tampon. Par ailleurs, la comparaison directe des valeurs obtenues avec celles des témoins ne révèle pas de captage important de phosphore filtrable sur la

boue recirculée. En effet, les gains observés lors des essais de recirculation (par rapport aux témoins) ont été plutôt marginaux compte tenu de la concentration équivalente de MES recirculées (200 mg-MES/L). L'inefficacité de la boue à éliminer le phosphore filtrable ne dépendrait pas de la concentration de phosphore disponible dans l'eau brute puisque le phénomène est observé autant dans des conditions de charge élevée que de charge moyenne (la charge faible ne permettant pas de discerner un tel effet). Ce fait est relativement surprenant puisque plusieurs auteurs (Eisenreich et Armstrong 1978; Lefort 1995; O'Brien et Warriner 1972; Thomas 1972) ont déjà démontrés l'effet adsorbant ou fixatif d'une boue. Une explication pourrait être que le phosphore filtrable est préférentiellement éliminé par réaction directe avec le coagulant, lorsque sa concentration est suffisamment élevée, plutôt que par captage sur la boue. Cela signifie que les forces (liens) retenant le phosphore filtrable sur la boue seraient plus faibles que celles liant le coagulant avec le phosphore filtrable (complexes chimiques). Ainsi, tout contact *a posteriori* du coagulant avec une boue ayant fraîchement capté du phosphore filtrable mènerait à une transition de ce phosphore vers le coagulant pour l'obtention d'une forme chimique plus stable. À l'opposé, l'injection du coagulant avant l'introduction de la boue laisserait peu de chance au processus de captage en raison de la force régissant la liaison coagulant-phosphore filtrable, à moins que la concentration de coagulant soit très faible. Dans ce cas, le phosphore n'ayant pas réagi initialement avec le coagulant pourrait alors être capté par la boue.

En ce qui concerne les consommations d'alcalinité, elles se sont situées en moyenne à 15 mg- CaCO_3/L pour l'ensemble des recirculations (séries A et B) comparativement à près de 14 mg- CaCO_3/L pour les témoins (moyenne des trois prises). La valeur moyenne de consommation

d'alcalinité a atteint près de 19 mg-CaCO₃/L lorsque les recirculations ont été conduites avec des eaux usées de forte charge tandis que la valeur s'est située à près de 12 mg-CaCO₃/L avec des eaux de faible charge. Théoriquement (Metcalf & Eddy 1991), un ajout d'alun de 2,40 mg-Al³⁺/L devrait contribuer à une consommation d'alcalinité de près de 13 mg-CaCO₃/L. Ainsi, l'ajout de la boue dans une eau de forte charge pourrait mener à une amélioration de l'efficacité de la coagulation subséquente (réactions chimiques). Ces résultats corroborent en bonne partie ceux obtenus précédemment (séries I à IV, § 3.1.3.).

3.2.3. Boues générées La figure 11 présente la masse de matières en suspension récupérées (mg) et les concentrations équivalentes de MES recirculées (mg-MES/L) pour les deux séries d'essais de perturbations A et B. Les valeurs mises en graphique ont été calculées à partir des volumes de boues recueillies lors des essais, de leur siccité et du volume de boues recirculées.

La figure 11b montre les différences entre les concentrations réelles de boues recirculées et l'objectif initialement visée pour l'essai (200 mg-MES/L). Ces différences s'expliquent par les difficultés à évaluer le taux de purge requis selon les différentes perturbations réalisées. Les résultats des premiers essais montrent une certaine carence en boue recirculée par rapport à l'objectif tandis que ceux des derniers s'en approchent d'avantage. Les effets de changements de charge de l'eau brute (perturbations) ne peuvent être clairement perçus sur la figure 11a en raison des masses de boues trop importantes dans les réacteurs lors des recirculations par rapport à celles générées avec le traitement d'une cuvée d'eau brute. Par ailleurs, les résultats obtenus valident l'hypothèse selon laquelle une variation du taux de recirculation (mg-MES/L) n'exerce pas d'influence significative sur la stabilité

et l'efficacité d'un procédé de coagulation-floculation dans lequel une partie de la boue est recirculée.

3.2.4. Implications pratiques Globalement, les résultats montrent que, dans une station d'épuration où une partie des boues sont recirculées, le processus normal d'ajustement des différentes concentrations de réactifs, en fonction des variations de charge de l'eau brute, n'a pas à être modifié. L'ajustement du taux de recirculation devrait cependant être inclus dans ce processus. L'effet «tampon» remarqué lors de certaines recirculations (d'une charge faible à une charge plus élevée et vice-versa) assure, en principe, un délai supérieur d'intervention aux opérateurs pour répondre à un changement de caractéristiques de l'eau brute. Toutefois, l'effet s'étant avéré peu important, les avantages pratiques risquent d'être peu perceptibles.

Par ailleurs, la comparaison des rendements obtenus avec et sans recirculation confirme certains résultats obtenus précédemment. La recirculation permet d'atteindre des abattements supérieurs à ceux obtenus sans ajout de boue. Les écarts sont d'autant plus importants que la charge de l'eau est élevée. L'ajustement de la concentration d'adjuvant de floculation (0,70 mg/L) en fonction de la masse de boues recirculées contribuerait de manière appréciable aux bons rendements observés.

Finalement, les résultats obtenus confirment l'hypothèse déjà avancée (§ 3.1.2.) concernant la stabilité d'un procédé de coagulation-floculation avec recirculation de boues. Son opération ne nécessiterait pas un degré de contrôle élevé du flux massique de boues recirculées ce qui en faciliterait l'intégration dans une station d'épuration existante.

3.3. MÉCANISMES DE COAGULATION-FLOCCULATION

Les essais effectués ont démontré que la recirculation permettait d'améliorer les rendements épuratoires lorsque la concentration d'adjuvant de floculation était ajustée à la masse de boues recirculées. Sans cet ajustement, les performances du procédé risquent d'être réduites, notamment si le taux de recirculation est élevée, en raison de problèmes reliés à la vitesse de décantation des floccs formés. Les éléments suivants ont pu être dégagés quant aux mécanismes régissant une coagulation-floculation avec recirculation de ses boues :

- les mécanismes prédominants, conduisant à une amélioration des rendements par rapport à un système classique, sont l'entrappage (*«enmeshment»*) et le balayage (*«sweep flocculation»*). En effet, les floccs formés, de dimension et en concentration plus importantes, permettent le balayage et la filtration du liquide ce qui contribue à un entrappage plus efficace des impuretés présentes. Le phénomène est directement lié à la qualité des pontages réalisés à l'étape de floculation et, par le fait même, à la concentration d'adjuvant de floculation injecté;
- bien que des consommations légèrement supérieures d'alcalinité aient été observées, le coagulant résiduel au sein de la boue ne contribuerait pas à un gain net de rendement. Les consommations d'alcalinité s'expliqueraient par une plus grande efficacité du coagulant injecté ou par une adsorption des bicarbonates par la boue;
- la boue ne jouerait pas un rôle prédominant dans l'initiation de la coagulation (noyau de coagulation). Par contre, elle favorise le processus de floculation en tant que «noyau de floculation». Par ailleurs, le lieu d'introduction de la boue dans le procédé ne serait pas critique à

condition que la boue soit injectée avant l'adjuvant de floculation. Sa dispersion dans la masse liquide doit également être complète avant tout contact avec l'adjuvant de floculation de manière à réduire l'instabilités du procédé;

- une compétition existerait entre la réaction directe du phosphore filtrable avec le coagulant et son captage par la boue recirculée. La réaction directe serait d'autant plus privilégiée que la concentration du coagulant est importante. De plus, l'ajout du coagulant après celui de la boue mènerait à une désorption plus ou moins complète du phosphore filtrable.

Comme plusieurs de ces résultats reposent sur un nombre limité de travaux expérimentaux, d'autres études sont requises afin de conclure définitivement sur les mécanismes avancés.

4. CONCLUSIONS

Cette étude visait à acquérir des connaissances sur la stabilité de fonctionnement d'un procédé de coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques produites. Elle a également conduit, par comparaison avec un procédé classique de coagulation-floculation, à une première évaluation de sa performance. Les essais ont permis d'établir certaines notions de base concernant le comportement du procédé et les mécanismes de coagulation-floculation. Pour atteindre les objectifs fixés et, dans une perspective d'application du procédé dans une station d'épuration existante, six séries d'essais ont été réalisées avec des réacteurs séquentiels pilotes en laboratoire. Les conclusions générales suivantes découlent des résultats obtenus :

- globalement, les conditions de stabilité sont atteintes dès les premiers cycles de recirculation, indépendamment du taux de recirculation de la boue (50% ou 100%). De plus, aucune dégradation notable de la qualité de l'eau traitée n'a été observée avec le nombre de cycles de recirculation effectués;
- la stabilité du procédé serait réduite par une dispersion inadéquate de la boue au sein de la masse liquide. Cette dispersion affecterait directement la stabilité du procédé (variations des rendements);
- l'intégration de la recirculation de boues au procédé classique de coagulation-floculation favorise une amélioration des rendements épuratoires lorsque la concentration d'adjuvant de floculation est ajustée à la masse de boues recirculées;
- une déficience en adjuvant de floculation entraîne une réduction des vitesses de chute des floes formés et une perturbation éventuelle des rendements obtenus. Cette déficience se reflète plus particulièrement sur l'élimination des MES et du phosphore total;
- des fluctuations de flux massiques de boues recirculées n'exercent pas d'influence significative sur la stabilité et l'efficacité du procédé;
- le procédé réagit rapidement à tout changement de charge de l'eau brute. Contrairement à ce qui était prévu, la masse de boues recirculées ne contribue pas de manière nette à absorber les variations de charges;
- les mécanismes de coagulation-floculation prédominants, dans l'amélioration des rendements par rapport à un procédé classique, sont l'entrappage et le balayage;
- la masse de boues générées est directement proportionnelle au taux de recirculation appliqué. La boue se conditionne et se déshydrate aussi aisément que celle générée par un procédé classique. De plus, la concentration optimale de conditionneur et la résistance spécifique «r» de la boue

semblent indépendantes du taux de recirculation;

- une compensation en adjuvant de floculation en fonction de la masse de boues recirculées conduit à des valeurs de matières décantables plus faibles (12% à 23%), à une siccité de boue plus élevée et à une diminution de la concentration optimale de conditionneur.

À l'échelle d'une station d'épuration, ces conclusions signifient que la mise en route instantanée d'un tel procédé ne devrait pas impliquer de difficultés apparentes, notamment si la concentration d'adjuvant de floculation est augmentée en fonction de la masse de boues recirculées. L'opération ne nécessiterait pas un degré de contrôle élevé du flux massique de boues recirculées. La période de dispersion de la boue et le mécanisme de dispersion constitueraient des aspects critiques à surveiller et à contrôler. Par ailleurs, puisque la masse de boues recirculées n'assure pas la stabilisation du procédé face aux variations de charges de l'eau brute, le processus habituel d'ajustement des différentes concentrations de réactifs ne serait pas modifié.

Finalement, les performances observées lorsque la concentration d'adjuvant de floculation est ajustée proportionnellement à la masse de boues recirculées sont prometteuses. L'optimisation du procédé devra cependant prendre en considération, en plus du taux de recirculation, la quantité et le coût de l'ensemble des produits chimiques nécessaires au traitement des eaux (coagulant, adjuvant de floculation) et à la déshydratation des boues (conditionneur). Plus précisément, des économies quant aux frais associés à l'achat de réactifs pourront être réalisées suite à un juste choix de taux de recirculation, à une augmentation appropriée de la concentration d'adjuvant de floculation et à un abaissement judicieux de la concentration de coagulant et ce, pour des rendements équivalents. Les

éventuelles recherches devraient donc s'orienter dans cette perspective, tout en s'efforçant à mieux comprendre le rôle de chacun des réactifs impliqués.

REMERCIEMENTS

L'auteur principal tient à remercier le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF), par le biais du Fonds de recherche et de développement technologique en environnement, pour son support financier. Cette étude s'inscrivait au volet 3 des orientations stratégiques du MEF portant sur la recherche et le développement de procédés de récupération et de revalorisation des sels métalliques. Des remerciements doivent également être adressés au personnel du *Centre d'épuration Rive-Sud* pour leur étroite collaboration ainsi qu'au Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) et au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) pour leur soutien financier.

BIBLIOGRAPHIE

American Public Health Association, American Water Works Association, et Water Environment Federation 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19^e éd. *Éditeurs* : American Public Health Association. Washington, D.C. 1108 p.

Bader, T.A. 1976. Water reuse in 100% secondary fibre pulping mill. TAPPI Second Fibers Conference, Los Angeles, 20-23 septembre 1976, pp. 31-35.

Desjardins, R. 1990. *Le traitement des eaux*. 2^e éd. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal. 304 p.

Eisenreich, S.J., et Armstrong, D.E. 1978. Adsorption of inorganic and organic phosphorus by amorphous aluminum hydroxide. *Journal of Environmental Science and Health, partie A*, A13(5-6) : 337-364.

Ignatenko, A.P. 1982. Improving the thickening of hydroxide sludges by using solid phase coagulation. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*, 55(10) : 2262-2266.

Jenkins, D., Ferguson, J.F., et Menar, A.B. 1971. Chemical processes for phosphate removal. *Water Research*, 5(7) : 369-389.

Khamenskii, E.V. 1969. *Crystallization from solutions*. Consultants Bureau, New York. 106 p.

Lanham, R.M., Tsai, K.-C., et Hubbs, S.A. 1984. Recycling of preformed alum sludge in the coagulation process. *Proceedings - American Water Works Association Annual Conference 1984*. Denver, CO. pp. 491-506.

Lefort, M. 1995. *Enlèvement du phosphore filtrable des eaux usées par l'intégration de la recirculation des boues chimiques au procédé de coagulation-floculation*. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal. 96 p.

Metcalf & Eddy, Inc. 1991. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. 3^e éd. McGraw-Hill, Inc., Boston. 1334 p.

O'Brien, J.D., et Warriner, T.R. 1972. The effects of aluminum sludge from water purification on municipal primary sewage treatment. Royal Military College of Canada. Civil Engineering Research Report CE 72-5. 72 p.

Thomas, E.A. 1972. Phosphate removal by recirculating iron sludge. Journal of the Water Pollution and Control Federation. 44(2) : 176-182.

Vainshtein, I.A., Babanina, A.I., Kudenko, G.A., et Shemetova, T.M. 1988. Thickening of heavy metal hydroxide sludges. Soviet Journal of Water Chemistry and Technology, 10(5) : 89-93.

Vesilind, P.A. 1988. Capillary suction time as a fundamental measure of sludge dewaterability. Journal of Water Pollution Control Federation, 60(2) : 215-220.

LISTE DES SYMBOLES

AF	adjuvant de floculation
CA	consommations d'alcalinité
CÉRS	Centre d'épuration Rive-Sud
DCO	demande chimique en oxygène
MES	matières en suspension
P filtrable	phosphore filtrable
P total	phosphore total
r	résistance spécifique de la boue
TR	taux de recirculation
TSC	temps de succion capillaire

Tableau 1. Protocole d'essais de coagulation-floculation avec recirculation de boues (colonnes).

Phase du protocole	Activité	Durée de l'activité
1. Préparatifs	1. Agitation des eaux usées dans le réservoir d'alimentation	Quelques minutes
	2. Pompage de 100 L. d'eau usée brute dans la colonne	Quelques minutes
	3. Agitation du contenu de la colonne	Quelques minutes
2. Injection des produits chimiques	1. Ajustement de la vitesse d'agitation pour maintenir un gradient de vitesse (G) de 500 s^{-1}	Quelques minutes
	2. Injection du coagulant ^a	Quelques secondes
	3. Temps d'attente assurant la dispersion du coagulant	1 minute
	4. Introduction de la boue au haut de la colonne	Quelques secondes
	5. Temps d'attente assurant la dispersion de la boue	1 ou 2 minutes
	6. Injection de l'adjuvant de floculation	Quelques secondes
	7. Temps d'attente assurant la dispersion de l'adjuvant de floculation	1 minute
	8. Ajustement de la vitesse d'agitation pour maintenir un gradient de vitesse (G) de 100 s^{-1}	Quelques secondes
3. Agitation et décantation	1. Maintien du gradient de vitesse (G) à 100 s^{-1}	17 minutes
	2. Arrêt de l'agitation	Quelques secondes
	3. Période de décantation	10 minutes
	4. Purge des prises d'échantillonnage	Quelques secondes
	5. Prélèvement des échantillons d'eau	Quelques secondes
4. Préparation des boues	1. Période additionnelle de décantation	15 minutes
	2. Prélèvement de 4 L. de boue au bas de la colonne	Quelques secondes
	3. Concentration gravitaire des boues prélevées et retrait du surnageant	10 minutes
	4. Préparation des boues à recirculer	---

^a : injection de la boue avant le coagulant lors de l'étude des conditions de stabilité après perturbations (période allouée à la dispersion de la boue : 2 min.).

Tableau 2. Rapports massiques pour les taux de recirculation 50% et 100% (FeCl₃; prise 2).

Taux de recirculation de la boue ferrugineuse (%)	Rapports massiques Fe consommé/Ptotal éliminé (mg-Fe/mg-P)			Rapports massiques Fe consommé/MES éliminées (mg-Fe/mg-MES)		
	Moyenne des essais témoins	Moyenne des recirculations #1 à #6	Moyenne des recirculations #1 à #10	Moyenne des essais témoins	Moyenne des recirculations #1 à #6	Moyenne des recirculations #1 à #10
50	2,41	2,47	---	0,0507	0,0533	---
100	3,39	---	3,08	0,1010	---	0,1044

Tableau 3. Caractéristiques des eaux employées (perturbations).

Paramètre	Unité	Écart type	Charge de l'eau brute		
			Faible ^a	Moyenne ^b	Élevée ^c
Matières en suspension	mg/L	+/- 3 mg/L	18	32	61
Phosphore total ^d	mg-P/L	+/- 0,02 mg-P/L	0,76	1,87	3,22
Phosphore filtrable ^d	mg-P/L	+/- 0,02 mg-P/L	0,58	1,41	2,51
Demande chimique en oxygène totale	mg-O ₂ /L	+/- 5 mg-O ₂ /L	39	71	138
Alcalinité	mg-CaCO ₃ /L	+/- 5 mg-CaCO ₃ /L	118	161	207
pH	---	+/- 0,1	7,5	7,5	7,3

a : obtenue par dilution au taux de 2,50 de l'eau usée de charge moyenne.

b : obtenue par dilution au taux de 1,75 de l'eau usée de charge élevée.

c : eau usée brute prélevée au CÉRS.

d : valeurs tenant compte du dopage au taux de 1,20 mg-P/L de l'eau usée de charge élevée.

Fig. 1. Colonne d'essais de coagulation-floculation.

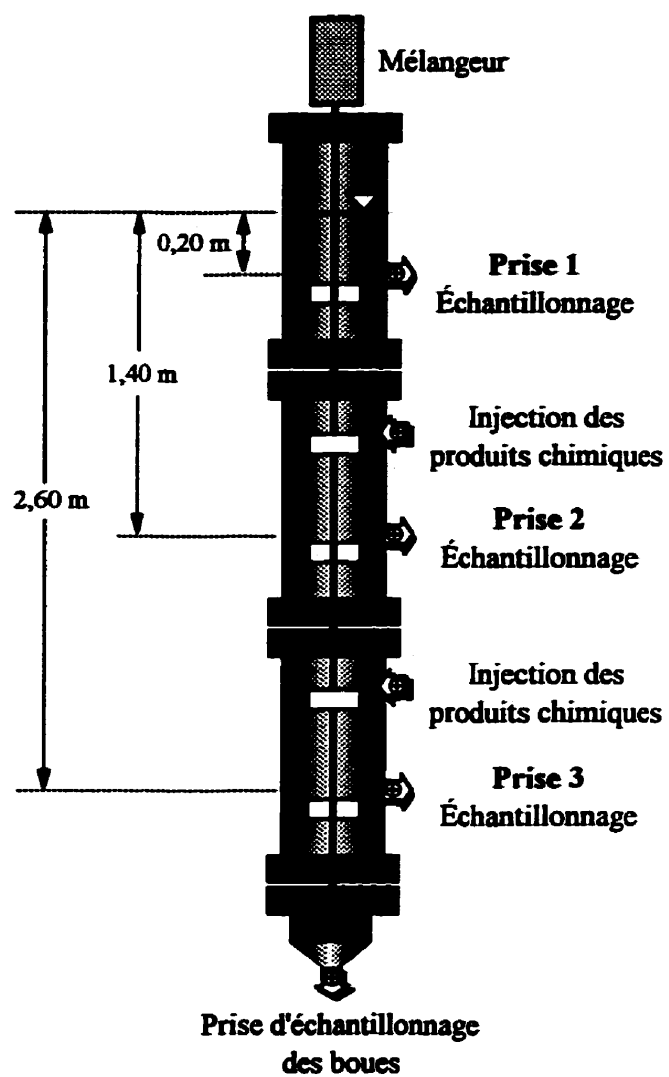
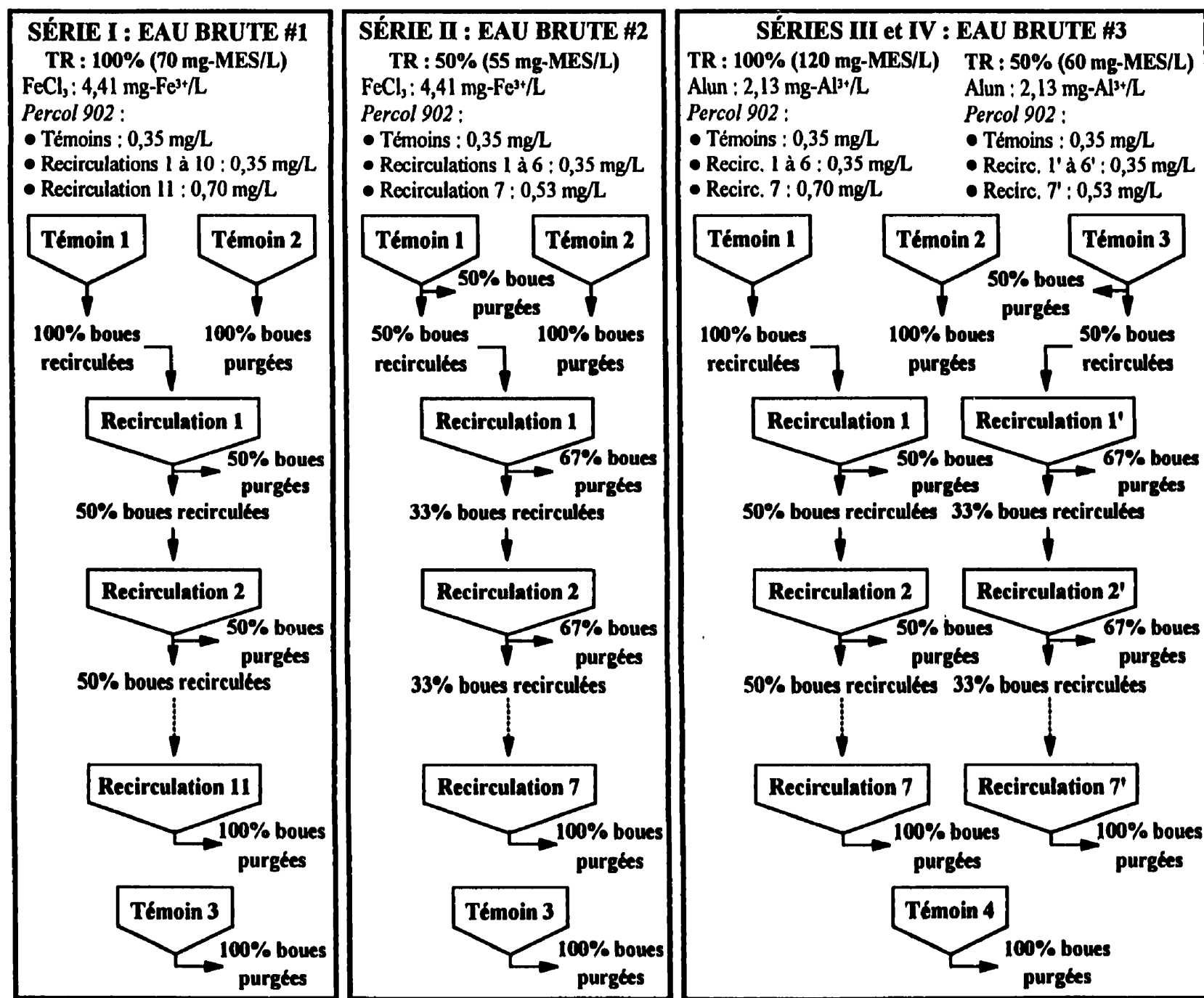


Fig. 2. Organigramme des essais de recirculation de boues réalisés (séries I, II, III et IV).



N.B. : TR = taux de recirculation

Fig. 3. Organigramme des essais de perturbations réalisés (séries VA et VB).

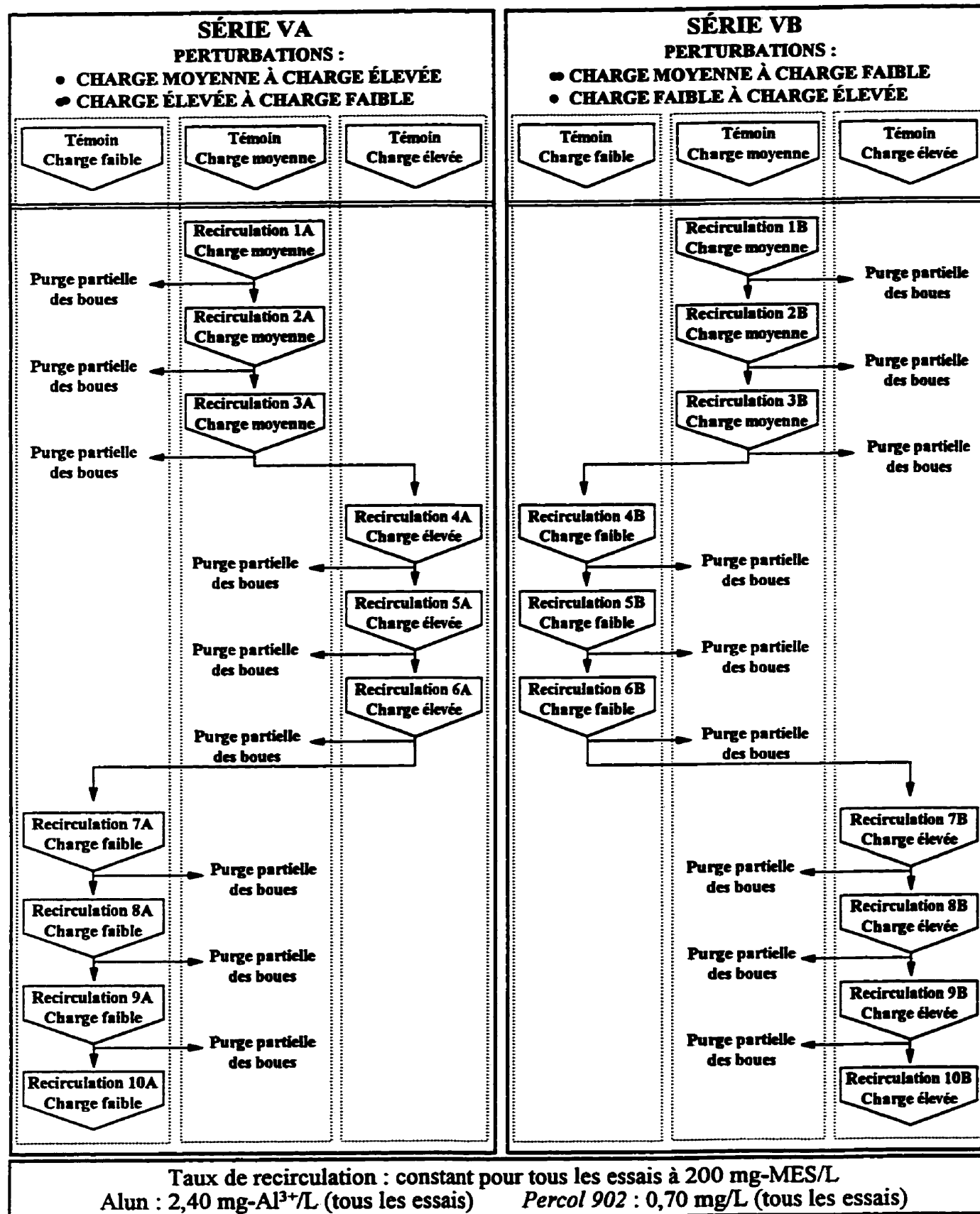


Fig. 4. Évolution de la stabilité du procédé (boues ferriques) : valeurs résiduelles
(a) de MES et (b) de phosphore total dans l'eau traitée.

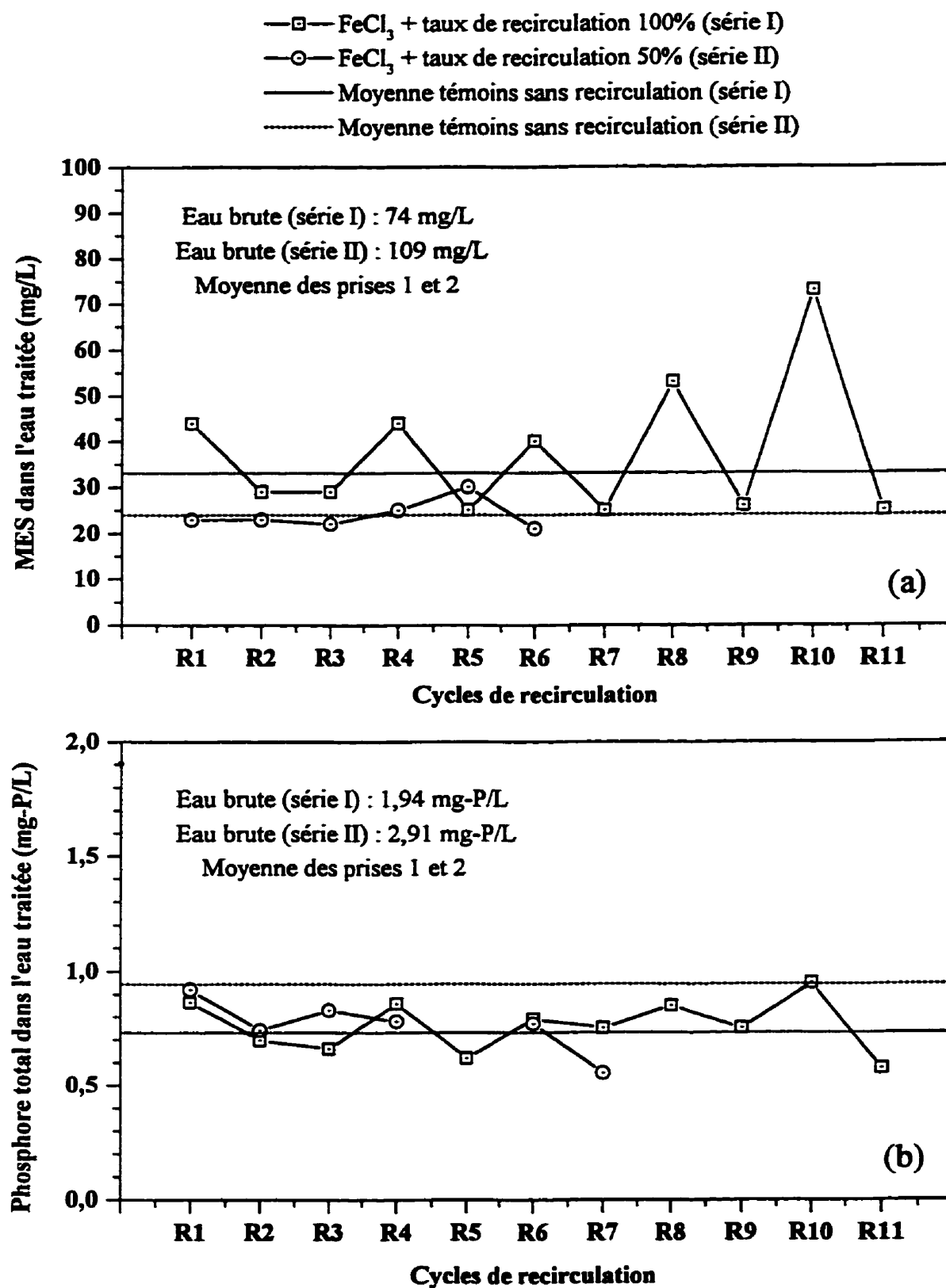


Fig. 5. Variation des résultats lors de la série d'essais I (boues ferriques) : valeurs résiduelles (a) de MES, (b) de phosphore total et (c) de fer total dans l'eau traitée.

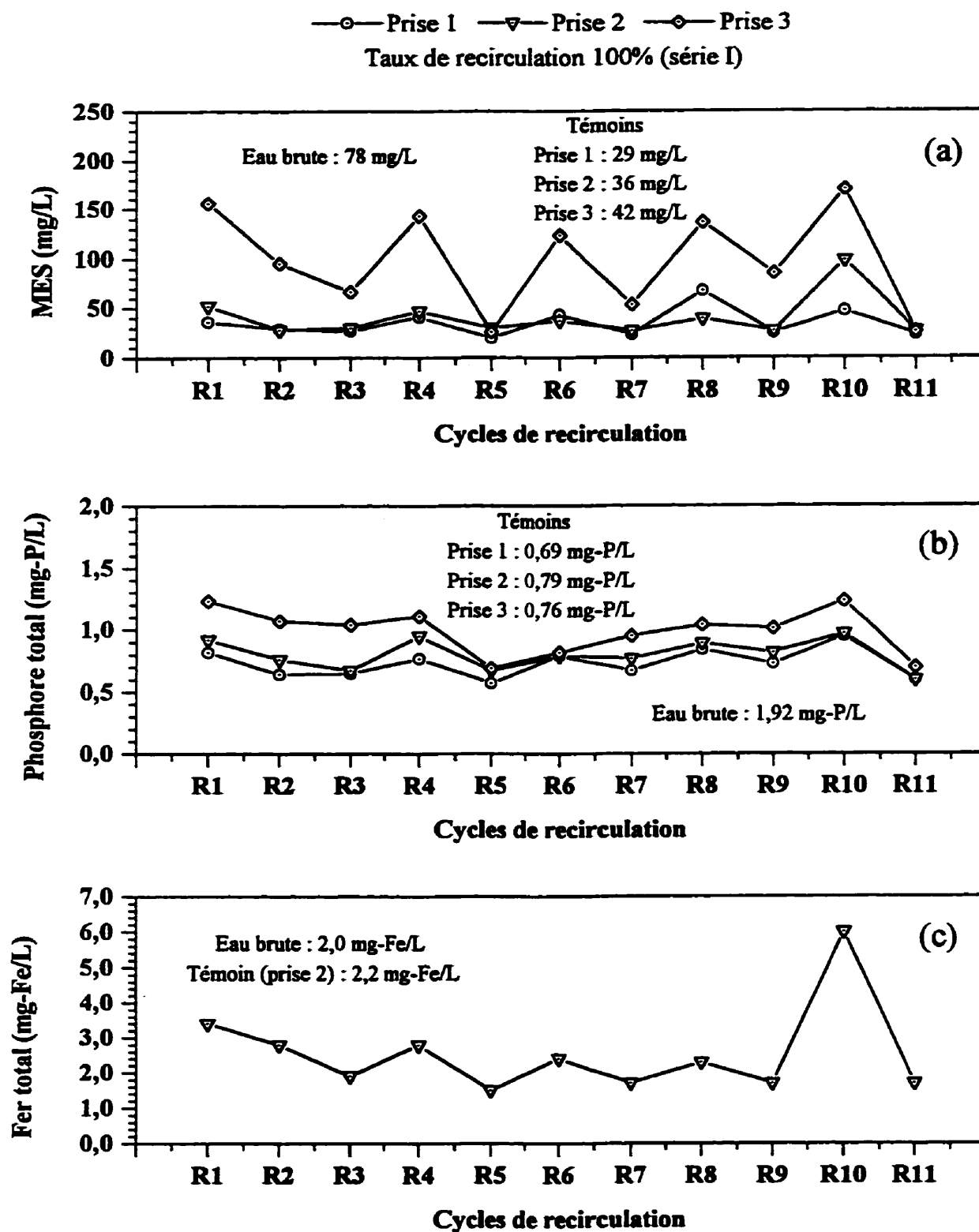


Fig. 6. Évolution de la stabilité du procédé (boues alumiques) : valeurs résiduelles (a) de MES et (b) de phosphore total dans l'eau traitée.

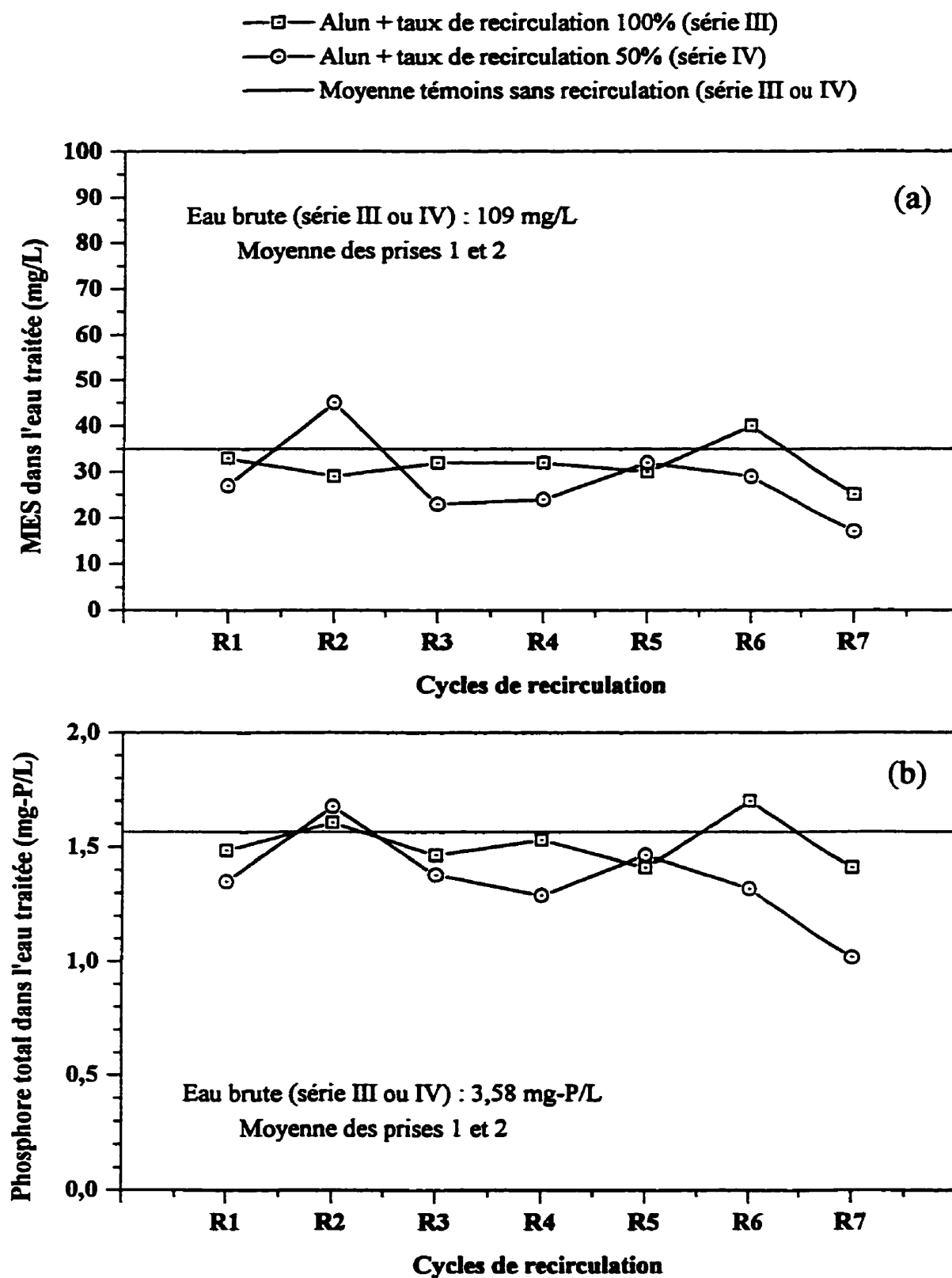


Fig. 7. Abattement du phosphore par prise d'échantillonnage : (a) FeCl_3 ; TR = 100%; P total; (b) alun; TR = 100%; P total; (c) FeCl_3 ; TR = 50%; P total; (d) alun; TR = 50%; P total; (e) FeCl_3 ; TR = 100%; P filtrable; (f) alun; TR = 100%; P filtrable; (g) FeCl_3 ; TR = 50%; P filtrable; (h) alun; TR = 50%; P filtrable. N.B. : TR = taux de recirculation et AF = adjuvant de floculation.

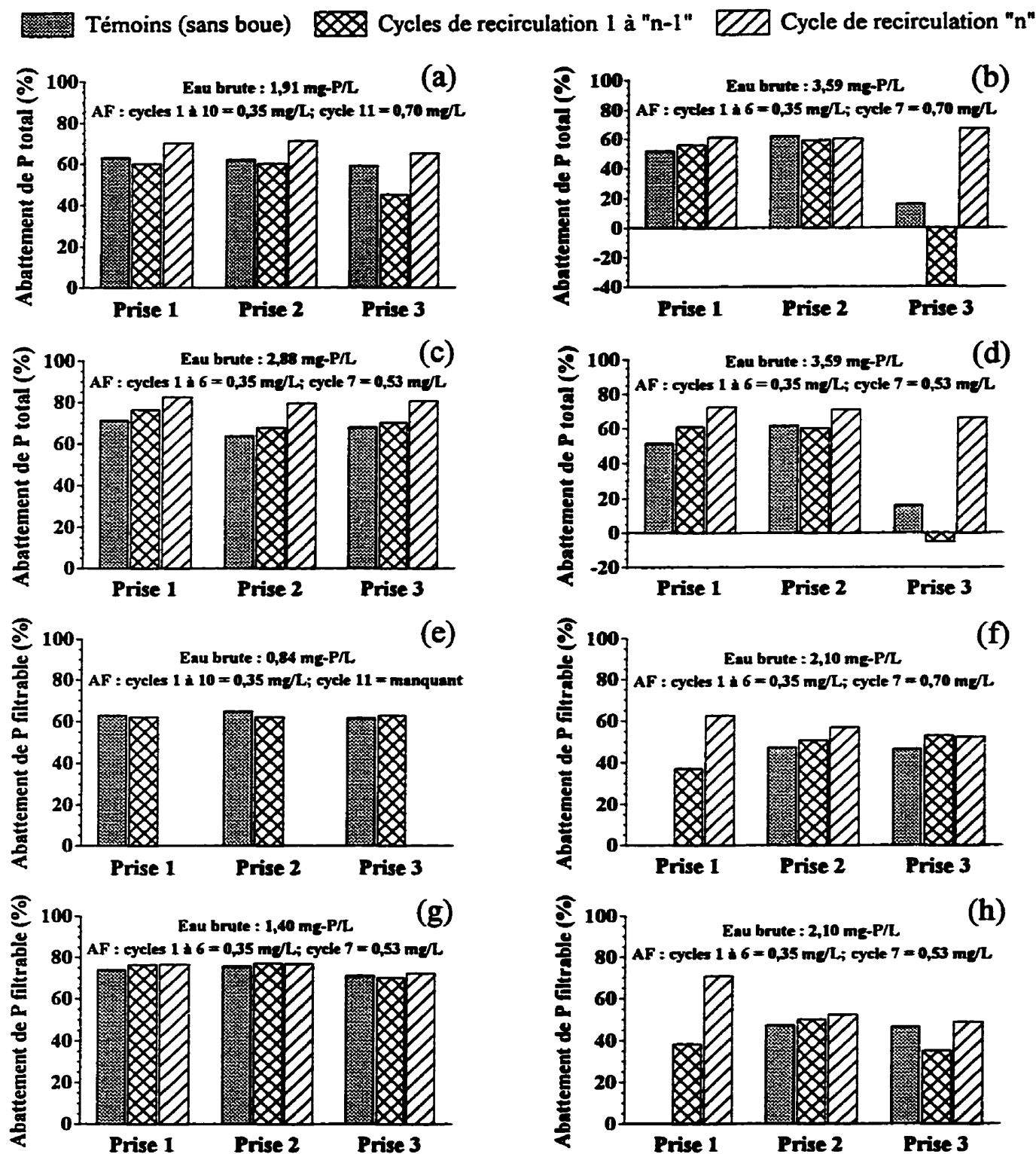


Fig. 8. Abattement des MES et consommations d'alcalinité (CA) par prise d'échantillonnage : (a) FeCl_3 ; TR = 100%; MES; (b) alun; TR = 100%; MES; (c) FeCl_3 ; TR = 50%; MES; (d) alun; TR = 50%; MES; (e) FeCl_3 ; TR = 100%; CA; (f) alun; TR = 100%; CA; (g) FeCl_3 ; TR = 50%; CA; (h) alun; TR = 50%; CA. N.B. : TR = taux de recirculation et AF = adjuvant de floculation.

■ Témoins (sans boue) ▨ Cycles de recirculation 1 à "n-1" ▩ Cycle de recirculation "n"

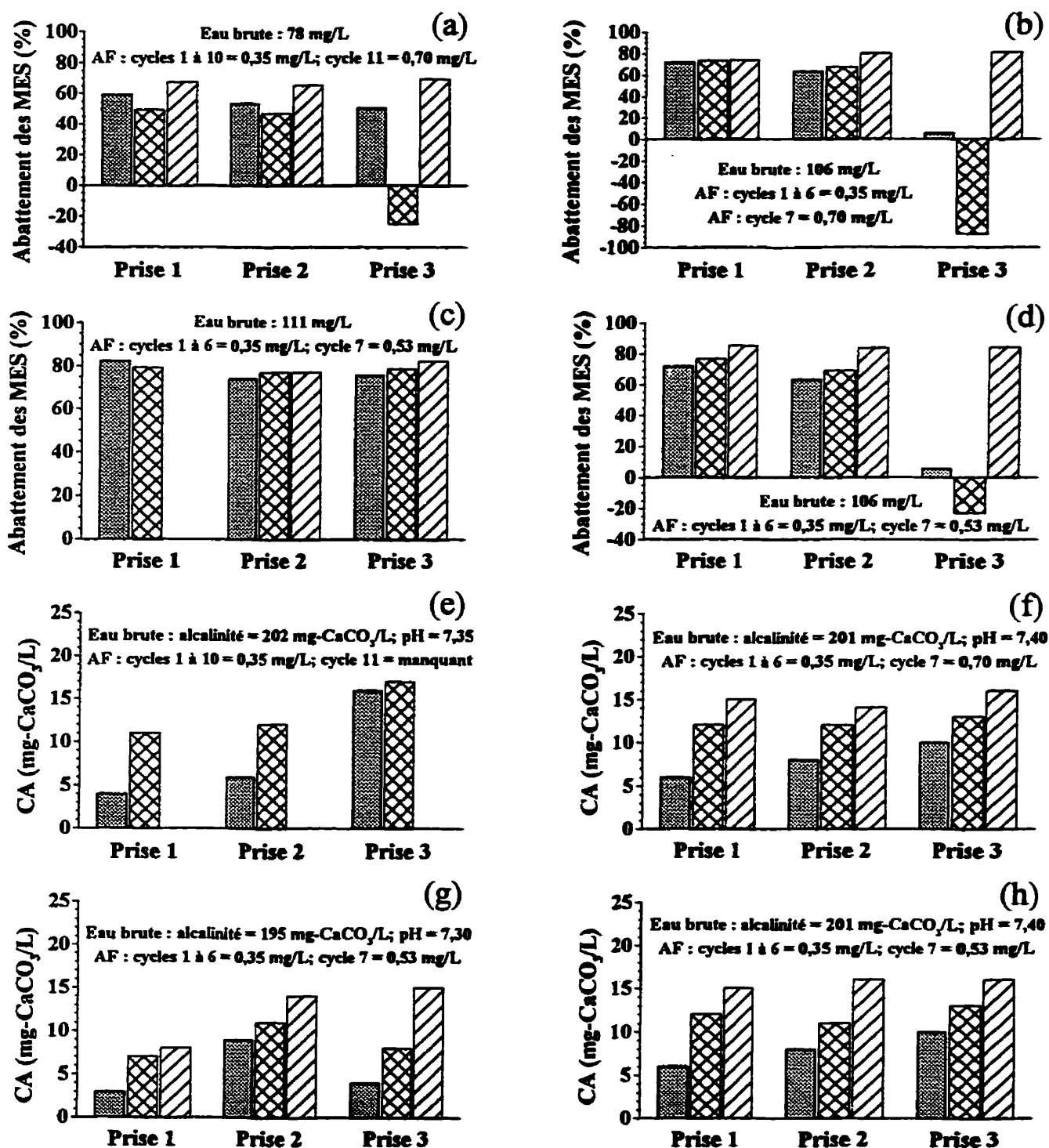


Fig. 9. Conditions de stabilité : effets de perturbations sur l'abattement (a) du phosphore total-série A, (b) du phosphore total-série B, (c) des MES-série A et (d) des MES-série B.

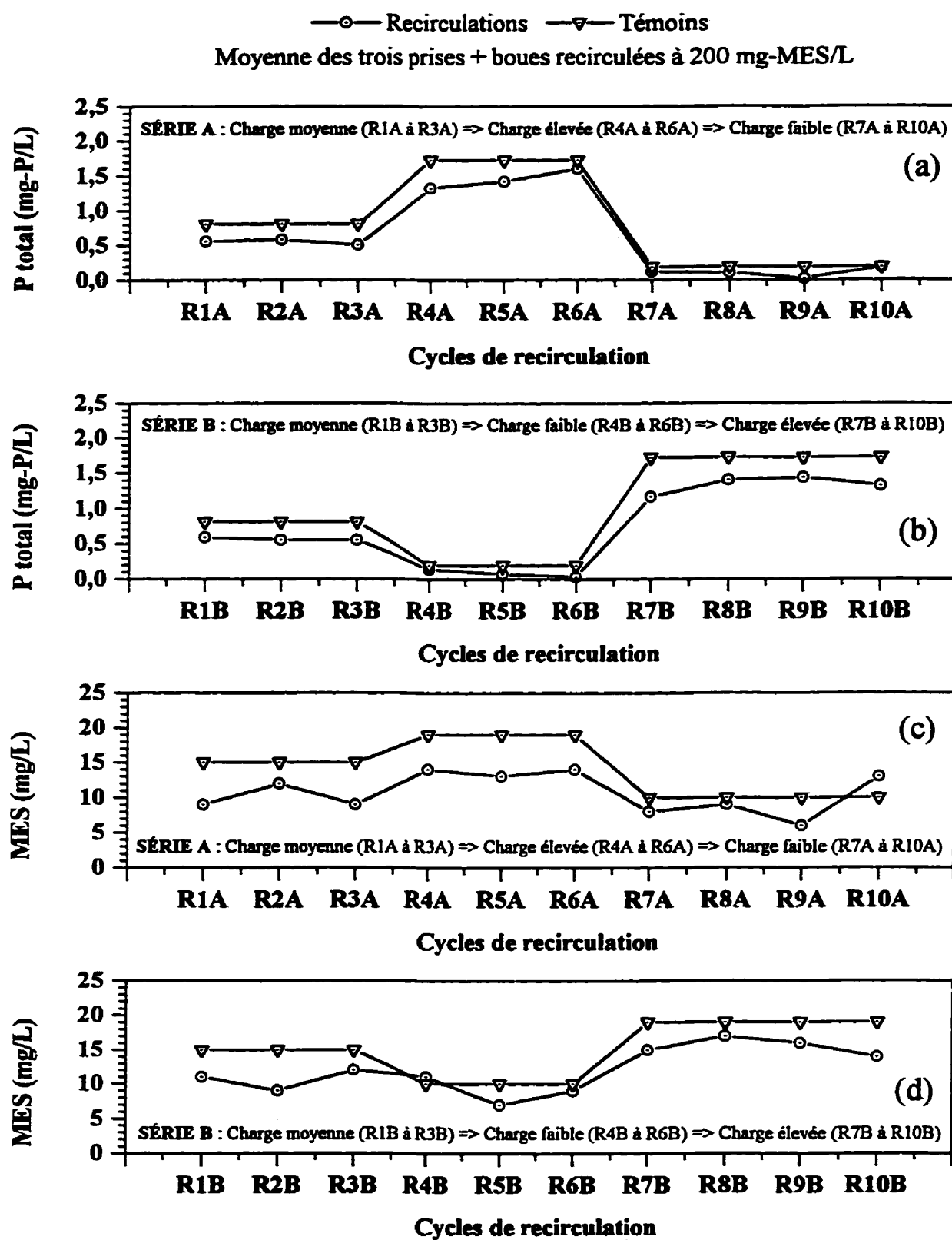


Fig. 10. Conditions de stabilité : effets de perturbations sur l'abattement (a) de la DCO totale-série A, (b) de la DCO totale-série B, (c) du phosphore filtrable-série A et (d) du phosphore filtrable-série B.

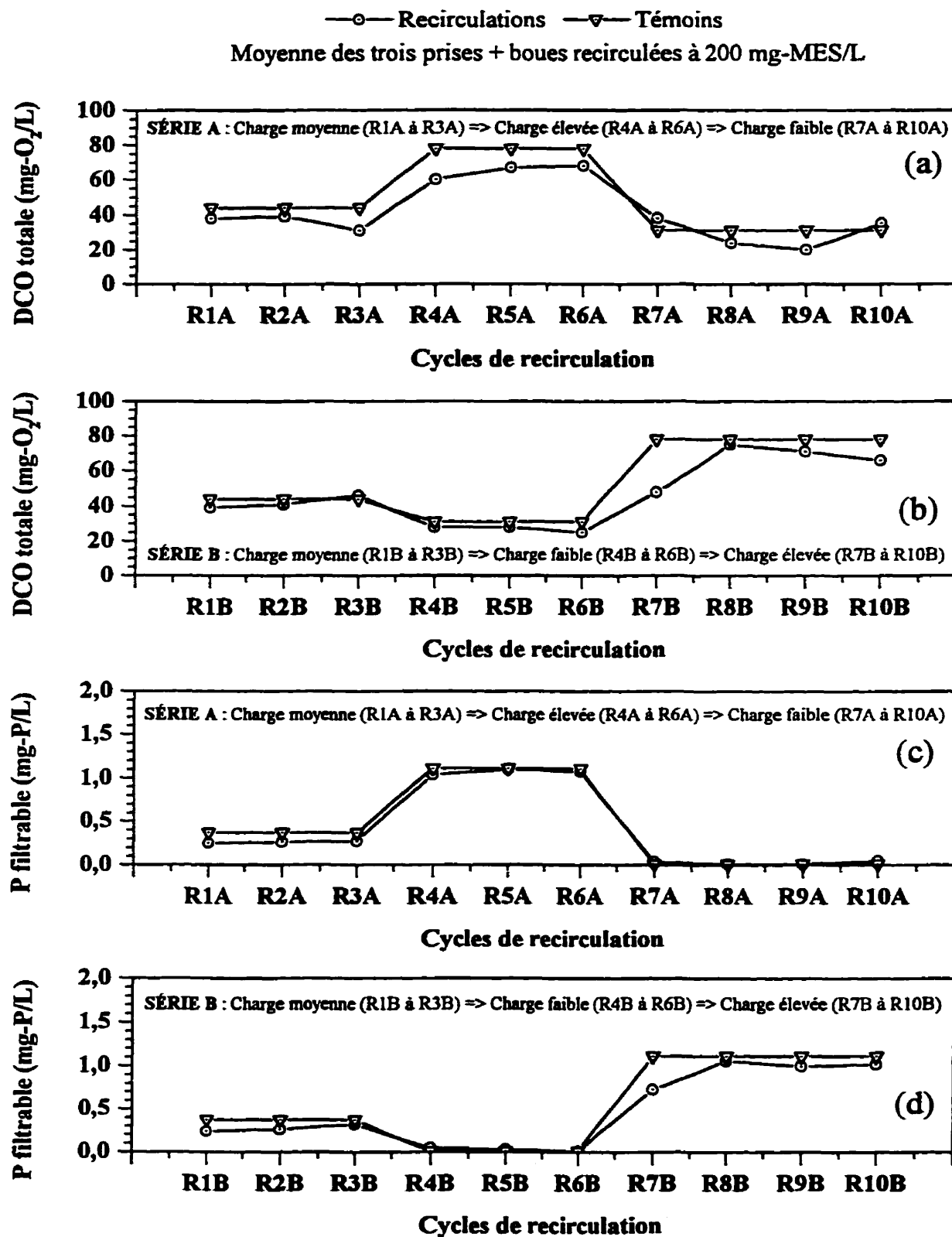
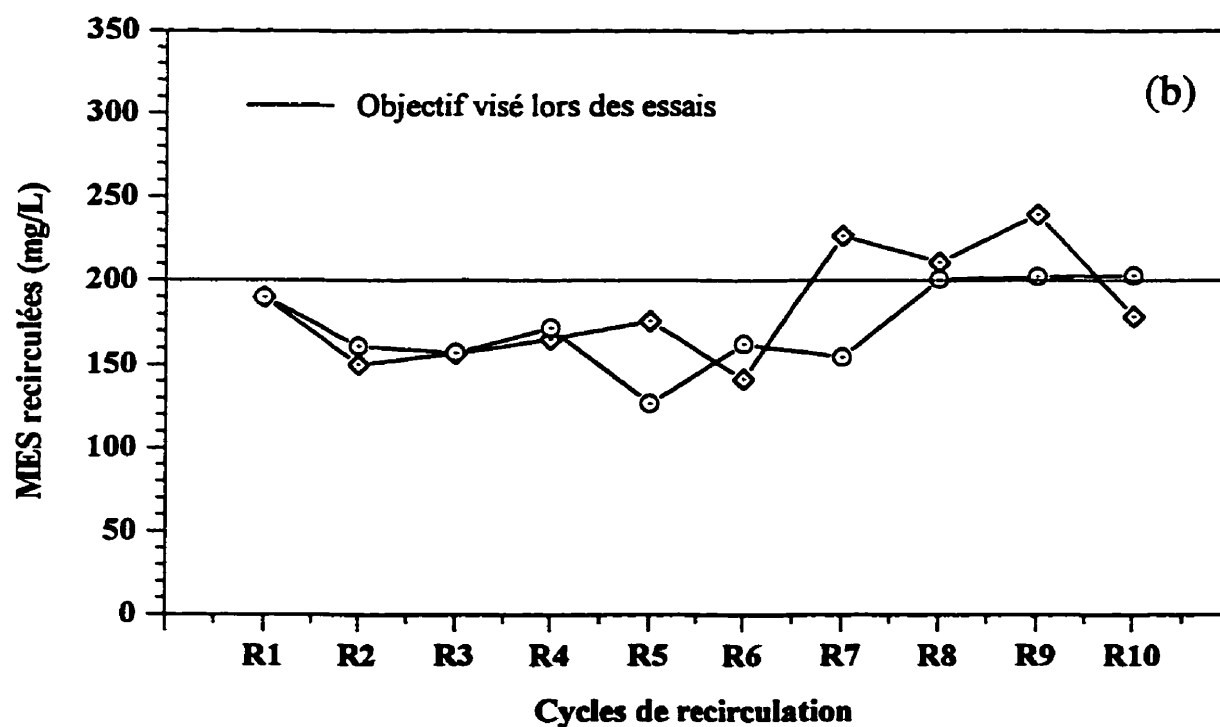
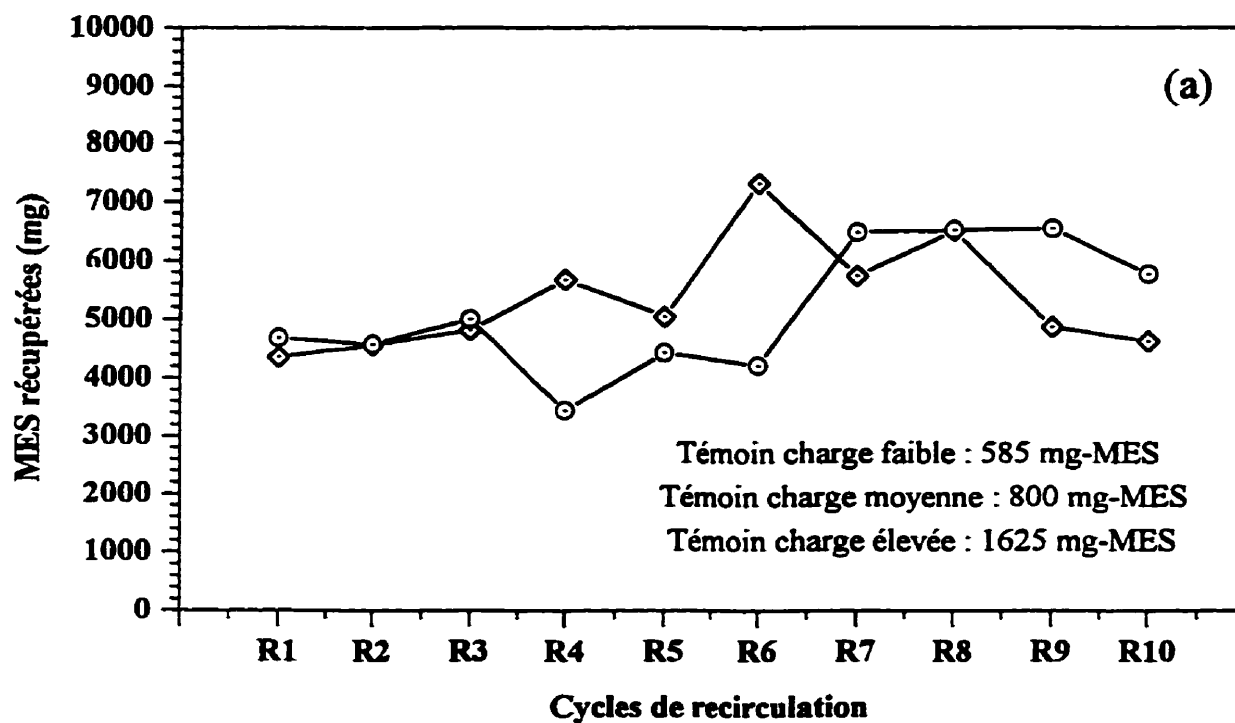


Fig. 11. Conditions de stabilité après perturbations : (a) masse estimée équivalente de MES récupérées et (b) concentration équivalente de MES recirculées.

SÉRIE A (—◇—) : charge moyenne (R1 à R3) => charge élevée (R4 à R6) => charge faible (R7 à R10)

SÉRIE B (—○—) : charge moyenne (R1 à R3) => charge faible (R4 à R6) => charge élevée (R7 à R10)



ANNEXE II

Article 2

Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : influence des réactifs

Auteurs : Frédéric MONETTE^a

François G. BRIÈRE^a

Michel LÉTOURNEAU^b

Marc DUCHESNE^c

Robert HAUSLER^c

Adresse des auteurs :

^a Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal,
Case postale 6079, succursale Centre-Ville, Montréal (Québec), H3C 3A7, Canada.

^b Groupe-conseil Génivar inc., 5355, boulevard des Gradins, Québec (Québec), G2J 1C8,
Canada.

^c Station expérimentale des procédés pilotes en environnement (STEPPE), Université
du Québec à Montréal, Case postale 8888, succursale Centre-Ville, Montréal (Québec),
H3C 3P8, Canada.

Article 2 soumis le 27 avril 1999 à la *Revue canadienne de génie civil*.

Résumé : Trois séries d'essais ont été réalisées en laboratoire et à l'échelle pilote afin d'étudier l'influence des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation, boue) sur le procédé de coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques urbaines. Les résultats ont montré que la boue participe favorablement au traitement et que les gains de rendement s'observent plus particulièrement pour de faibles concentrations de coagulant et lorsque que la concentration d'adjuvant de floculation n'est pas limitative. Le processus de «captage» d'impuretés par la boue augmente avec le taux de recirculation mais serait réversible et assujetti à la concentration de coagulant injectée. Les résultats révèlent également qu'il est avantageux d'introduire la boue avant le coagulant. Pour diminuer les frais d'achat de réactifs d'une station d'épuration, la stratégie consiste à réduire la concentration de coagulant et d'augmenter celle de l'adjuvant de floculation tout en maintenant un flux massique de boue suffisant pour retirer des gains significatifs. À cet effet, un taux de recirculation supérieur à 300 mg-MES/L assurerait des économies de l'ordre de 10%.

Mots clefs : Recirculation, boues, flocs préformés, réactifs, coagulation-floculation, traitement, eau usée.

Abstract: Three series of tests were carried out at laboratory and pilot levels in order to examine the functions of reagents (coagulant, flocculant, sludge) involved in a coagulation-flocculation process with chemical sludge recycling. Results showed that the recycled sludge participates favourably in the process. The gains in efficiency are particularly significant for lower coagulant concentrations when flocculant concentration is not limitative. The pollutant removal increases with the sludge recycling load but seems reversible and dependant on coagulant concentration. Results also revealed the advantages of recycling sludge before injecting coagulant. To decrease the total chemical costs at a wastewater treatment plant, strategy must focus on diminishing the coagulant concentration and increasing the flocculant concentration while maintaining a sufficient recycling sludge load to assure gains in efficiency. A 10% reduction cost is expected for a sludge recycling load over 300 mg-SS/L.

Key-Words: Recycling, sludge, preformed flocs, reagents, coagulation-flocculation, treatment, wastewater.

1. INTRODUCTION

La présente étude fait suite à une première phase de travaux de recherche portant la performance générale et la stabilité d'un procédé de traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques d'origine urbaine (Monette *et al.* 1999). Elle s'inscrit dans une suite de travaux de recherche qui aboutira à l'étude du processus de recirculation dans une station d'épuration existante.

Très peu de travaux ont pu être répertoriés dans la documentation scientifique quant à l'étude, en conditions contrôlées, de l'influence de chacun des réactifs au sein d'un procédé de coagulation-floculation qui implique la recirculation de ses boues. De surcroît, peu d'entre-eux ont abordé le cas particulier de la recirculation d'une boue chimique d'origine urbaine dans un procédé de traitement physico-chimique des eaux usées. Règle générale, les expériences se sont arrêtées à l'étude de la recirculation ou de la réutilisation des boues d'eau potable, boues qui possèdent des caractéristiques très distinctes de celles d'épuration des eaux usées. Une meilleure connaissance du rôle de chacun des réactifs impliqués (coagulant, adjuvant de floculation et boue) permettra de maximiser l'efficacité d'une coagulation-floculation intégrant une recirculation.

1.1. REVUE DE LA DOCUMENTATION SCIENTIFIQUE

Monteith et Baldwin (1974) ont réalisé des essais en laboratoire et sur pilotes dans le but de vérifier le potentiel d'utilisation des boues d'alun (eau potable) pour l'enlèvement de phosphates des eaux

usées municipales. Selon les résultats obtenus en laboratoire (béchers), les hydroxydes d'aluminium formés durant le processus de purification des eaux (potables) sont aptes, à eux seuls, à abattre la majeure partie des phosphates et des MES ainsi qu'une certaine quantité de matière organique. D'autres essais menés à l'échelle pilote ont également permis de conclure à l'efficacité de la boue d'alun, lorsqu'elle est ajoutée en quantité suffisante, pour le traitement des eaux usées. Cependant, de meilleurs résultats peuvent être atteints en ajoutant une petite quantité d'alun commercial avec la boue. En effet, une utilisation conjointe d'alun commercial et de boues d'alun réduirait de 50% l'ajout de coagulant neuf, tout en optimisant l'efficacité du traitement.

Ces auteurs ont également démontré que la boue recirculée dans un procédé de traitement d'eaux usées avait les mêmes propriétés que la boue d'alun (eau potable) pour l'enlèvement des phosphates. Cette recirculation permettrait de réduire les quantités d'alun commercial et de boue d'alun (eau potable) requises pour l'enlèvement de phosphates. Pour être efficace, la boue d'alun doit cependant être recirculée rapidement puisque sa capacité à éliminer les phosphates diminue avec le temps.

Pour sa part, Thomas (1972) a évalué le degré d'élimination des phosphates d'une eau usée lorsque différentes quantités de boues ferriques (10 à 200 mL/L) sont recirculées sans ajout de coagulant. Les résultats ont révélé que la précipitation des phosphates débutait dès que le volume de boue introduit atteignait 60 mL/L. La précipitation augmentait par la suite avec la quantité de boue ajoutée. Aucune donnée n'est par contre fournie quant à la concentration exacte de boues recirculées (mg-MES/L). Une autre séquence d'essais a également été conduite dans le but d'étudier l'effet de différents ajouts de boues ferriques en présence d'une concentration constante de chlorure

ferrique ($10 \text{ mg-Fe}^{3+}/\text{L}$). Cette série d'essais a démontré que la recirculation de boues ferriques permettait de tripler l'abattement de phosphates observé avec une injection unique de coagulant à $10 \text{ mg-Fe}^{3+}/\text{L}$ (24% d'abattement). Selon l'auteur, l'ajout de chlorure ferrique assurerait la réactivation de la boue ferrique. Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Monteith et Baldwin (1974) avec une boue d'eau potable.

Par ailleurs, d'autres essais complémentaires menés par Thomas (1972) ont révélé que l'efficacité des boues ferriques à fixer les phosphates diminuait progressivement avec leur vieillissement. Ces résultats corroborent ceux de Monteith et Baldwin (1974). Selon Thomas (1972), le vieillissement de la boue peut être contré par l'ajout de chlorure ferrique (réactivation).

Par ailleurs, Stepko (1976) a effectué à Trenton (Ontario, Canada) des essais de recirculation de boues d'alun du traitement tertiaire d'une station d'épuration biologique. La recirculation continue des boues décantées à la sortie du bassin d'aération a résulté en une réduction de 57% de l'alun requis pour l'enlèvement du phosphore. De plus, un enlèvement du phosphore filtrable au-delà des quantités stœchiométriques a été observé durant les périodes de faible ajout d'alun commercial. Selon ces résultats, la boue d'alun recirculée avait une grande affinité pour les phosphates.

Evers (1973) s'est intéressé plus particulièrement aux mécanismes d'enlèvement des phosphates par l'alun. Il estime que plusieurs mécanismes se produisent alors simultanément. L'alun réagit avec les orthophosphates pour former un précipité colloïdal. Des floccs d'hydroxydes d'aluminium sont également formés par réaction de l'alun avec l'alcalinité de l'eau. Ces floccs peuvent ensuite favoriser

la coagulation des précipités colloïdaux de phosphates et des phosphates insolubles et adsorber une certaine proportion de phosphates organiques. Les mécanismes avancés par Evers (1973) expliqueraient la participation d'une boue d'eau potable, formée essentiellement d'hydroxydes d'aluminium, au processus d'épuration des eaux usées.

Dans cette même perspective, Snoeyink et Jenkins (1980) indiquent que, par rapport à la stœchiométrie (au pH optimal), une quantité supplémentaire de sels d'aluminium est nécessaire pour précipiter les phosphates sous la forme de $\text{AlPO}_{4(s)}$. Cette situation s'explique par le fait que la précipitation des phosphates s'accompagne de celle d'hydroxydes d'aluminium $[\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}]$ et d'une consommation du coagulant due aux impuretés de l'eau. Toutefois, les hydroxydes jouent un rôle essentiel puisqu'ils favorisent l'élimination du précipité de $\text{AlPO}_{4(s)}$, qui est fin et difficile à décanter. Ces auteurs précisent également que les précipités de $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ adsorbent ou incorporent les phosphates. Cette nouvelle phase solide, amorphe, appelée hydroxophosphate d'aluminium $[\text{Al}_x(\text{OH})_y(\text{PO}_4)_z]_{(s)}$, s'incorpore à la boue produite lors du traitement des eaux usées. Ce solide contiendrait initialement un excès d'hydroxydes (OH^-) comparativement à sa forme âgée (vieille), ce qui suppose que sa recirculation serait efficace pour éliminer les phosphates par effet de substitution des hydroxydes présents (Jenkins *et al.* 1971). La formation d'hydroxophosphates d'aluminium est également soulignée par Stumm et Morgan (1996). L'excès d'hydroxydes, par rapport aux phosphates présents au sein de cette phase solide, s'amenuiserait avec le remplacement des hydroxydes par les phosphates. Le ratio $\text{OH}^-/\text{PO}_4^{3-}$ au sein du précipité ainsi que ses propriétés d'adsorption sont fortement reliés au pH ainsi qu'au degré d'hydrolyse de l'aluminium à son point d'injection (Jenkins *et al.* 1971). Selon Stumm et Morgan (1962), le phosphate (ligand) a une

tendance d'autant plus forte à pénétrer au sein du précipité que le pH diminue, et ce, afin de satisfaire les besoins de coordination du métal (aluminium). Peu importe la variation du ratio $\text{OH}^-/\text{PO}_4^{3-}$, le nombre total de charges négatives demeurerait constant afin d'assurer l'électro-neutralité du complexe d'hydroxophosphate d'aluminium. À l'inverse, le remplacement des phosphates par les hydroxydes au sein de la phase solide peut également se produire lorsque le pH augmente. Ce fait est également confirmé par Jenkins *et al.* (1971) qui indiquent qu'un largage des phosphates de la boue est anticipé suite à une augmentation de pH.

Finalement, Amirtharajah et Mills (1982) précisent que la charge du précipité $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ est faiblement négative à un pH supérieur à 8,0 et fortement positive à un pH inférieur à 7,0. À un pH se situant entre 7 et 8 et à une concentration d'alun de 30 mg/L (2,7 mg- Al^{3+} /L), le précipité formé est chargé positivement. Ainsi, selon ces auteurs, les processus d'entrappage et de balayage («*sweep flocculation*») est amélioré par la possibilité d'une coagulation mutuelle ou d'une hétérocoagulation entre les colloïdes de charges négatives et les précipités de $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ de charges positives. La recirculation d'un tel précipité pourrait donc être bénéfique au traitement des eaux.

1.2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le premier objectif de cette étude consiste à vérifier et à préciser l'effet de chacun des réactifs ajoutés, le coagulant, l'adjuvant de floculation et la boue, sur la coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques d'origine urbaine. Dans le cadre des présents travaux, la boue sera considérée au même titre que le coagulant et l'adjuvant de floculation, c'est-à-dire comme un réactif

nécessaire à la coagulation-floculation, bien qu'elle soit issue du procédé lui-même. Simultanément, une comparaison des performances des différents triplets de concentrations *coagulant • adjuvant de floculation • boue* sera réalisée en vue d'une éventuelle évaluation économique préliminaire. Lors de cette étude, le coût relié à l'ajout de boue sera considéré comme négligeable puisque ce réactif est produit sans frais direct dans une station d'épuration. Cependant, dans les faits, certaines dépenses d'immobilisation et d'opération reliées à la mise en oeuvre de la recirculation doivent être engagés.

Le second objectif vise à déterminer le lieu d'introduction optimal de la boue dans le procédé de coagulation-floculation. L'atteinte de cet objectif permettra notamment de confirmer (ou d'infirmer) les conclusions tirées par Lanham *et al.* (1984) sur l'avantage de recirculer des boues avant l'injection des réactifs chimiques. Finalement, cette étude vise aussi à améliorer le niveau de connaissances associées aux mécanismes de coagulation et de floculation mis en jeu lors de la recirculation de boues chimiques d'origine urbaine.

Pour atteindre les objectifs fixés, plusieurs séries d'expériences ont été réalisées en laboratoire et à l'échelle pilote. Tout comme lors de l'étude précédente (Monette *et al.* 1999), ces expériences ont été conduites dans une perspective d'application dans une station d'épuration existante, soit le *Centre d'épuration Rive-Sud* (CÉRS) de Longueuil (Québec, Canada).

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. GÉNÉRALITÉS

Tous les essais de coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques ont été réalisés avec des eaux usées dégrillées et dessablées, prélevées au CÉRS. Le coagulant et l'adjuvant de floculation choisis lors de cette étude ont été respectivement l'alun $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$ et le *Percol 902* d'*Allied Colloids* (anionique). L'alun a été dilué 10 fois avec de l'eau distillée avant son utilisation (pH de la solution contrôlé à l'acide sulfurique).

2.2. ÉQUIPEMENTS

Les expériences ont été conduites en laboratoire (bêchers de 2 L) et à l'échelle pilote dans des réacteurs en cuvette de 100 L de capacité. Les essais en bêchers ont été réalisés sur des bancs de coagulation-floculation *Phipps & Birds (Richmond)* et les essais pilotes ont été menés sur le montage expérimental décrit par Monette *et al.* (1999).

2.3. PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX ET ESSAIS DE RECIRCULATION

Le tableau 1 présente en détail le protocole suivi lors des essais en bêchers. Ce protocole a été fidèlement respecté sauf pour certains essais visant l'étude spécifique du lieu d'introduction de la boue pour lesquels la séquence d'injection des réactifs (boue, coagulant) a été inversée. Les essais menés sur les réacteurs pilotes ont été conduits suivant le protocole détaillé par Monette *et al.* (1999). La boue a toutefois été introduite avant le coagulant et deux minutes ont été allouées pour sa dispersion. Tous les essais ont été effectués avec des eaux usées stabilisées à la température ambiante du laboratoire, soit aux environs de 22°C.

Trois séries d'essais ont été complétées lors de cette étude (I, II, III). La première série, réalisée en béchers, a mené à l'étude de deux lieux d'introduction de la boue, soit aux séquences suivantes d'ajout de réactifs :

séquence 1 : *boue* → *coagulant* → *adjuvant de floculation*

séquence 2 : *coagulant* → *boue* → *adjuvant de floculation*

Les concentrations de coagulant, d'adjuvant de floculation et de boue ont été respectivement de 2,4 mg- Al^{3+} /L, 0,3 mg/L et 140 mg-MES/L.

La seconde série, également réalisée en béchers, a permis l'évaluation des effets de différentes combinaisons de concentrations des réactifs sur le procédé (tableau 2). Au total, quatre concentrations de chacun des trois réactifs ont été considérées, menant ainsi à la réalisation de $4^3 = 64$ essais. Les concentrations de boues étudiées correspondaient à des équivalents de charges ajoutées de 57, 228 et 400 mg-MES/L.

Enfin, la troisième série d'essais, conduite avec les réacteurs pilotes, a mené à une étude plus restreinte des réactifs (tableau 2). Au total, deux concentrations de coagulant et quatre d'adjuvant de floculation ont été considérées pour une seule concentration de boues recirculées (16 essais). La concentration de boue, choisie sur la base des résultats obtenus en béchers, équivalait à près de 200 mg-MES/L. Compte tenu des résultats des travaux antérieurs (Monette *et al.* 1999), un seul cycle de recirculation a été pratiqué pour chacun des essais pilotes.

Par ailleurs, les boues nécessaires aux trois séries d'essais ont été produites avec chacune des eaux usées concernées, quelques heures avant les expériences, à même les réacteurs pilotes et selon le protocole pré-établi mais sans introduction de boues. Les concentrations d'alun et d'adjuvant de floculation ont alors été arbitrairement fixées à 3,38 mg- Al^{3+} /L et 0,35 mg/L lors des productions de boues. Bien que cette procédure ne soit pas idéale, elle a facilité la production de boues fraîches non digérées, en quantité suffisante, dans des conditions de laboratoire. Lors de chacune des séries, des essais témoins ont été réalisés dans les mêmes conditions afin comparer les performances obtenues.

2.4. MÉTHODES ANALYTIQUES

Toutes les analyses ont été conduites selon les méthodes normalisées indiquées au manuel *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA *et al.* 1995). Les analyses des MES et des paramètres filtrables ont été réalisées avec des membranes en fibre de verre 934-AH de Whatman d'une porosité de 1,5 μm . Les mesures de turbidité ont été réalisées avec un turbidimètre de marque HACH (modèle 2100P).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. ÉTUDE DU LIEU D'INTRODUCTION DE LA BOUE (SÉRIE I)

La figure 1 présente, pour les trois paramètres étudiés (MES, turbidité et phosphore total), les résultats moyens obtenus pour les deux lieux d'introduction de boues étudiés. En guise de

comparaison, les résultats des essais témoins y sont également présentés.

L'examen de la qualité des eaux traitées révèle l'effet bénéfique d'une recirculation de boues lorsque ces dernières sont ajoutées avant le coagulant. En effet, des valeurs d'abattement de près de 30% supérieures ont été observées lorsque la boue est introduite avant le coagulant, quel que soit le paramètre de qualité considéré (MES, turbidité ou phosphore total). Ces résultats corroborent ceux obtenus par Lanham *et al.* (1984) lors du traitement d'une eau de rivière avec un ajout de boue d'alun. Ces mêmes écarts de près de 30% sont également observés avec les résultats des essais témoins. Différentes hypothèses peuvent être avancées afin d'expliquer les résultats obtenus :

- selon Thomas (1972), le coagulant ajouté après la boue «réactiverait» celui présent dans la boue favorisant ainsi une augmentation des rendements lorsqu'une recirculation est réalisée avant l'ajout du coagulant. Cet auteur ne précise toutefois pas le mécanisme de «réactivation» du coagulant présent dans la boue;
- la boue permettrait, par simple balayage, l'élimination d'une fraction de la charge polluante, laissant ainsi le coagulant agir de manière plus efficace sur la charge restante. Le phénomène de balayage serait d'autant plus efficace que le taux de recirculation est élevé. De plus, selon Amirtharajah et Mills (1982), le balayage est également amélioré par la possibilité de coagulation due à la présence du précipité de $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ chargé positivement (pH entre 7 et 8);
- les floccs ajoutés sous la forme de boue contiendraient suffisamment d'espèces polycationiques résiduelles pour favoriser une agglomération des colloïdes selon un mécanisme de «compression de la couche diffuse/adsorption/neutralisation des charges». Ces espèces, telles $[\text{Al}_2(\text{OH})_2]^{4+}$,

$[Al_7(OH)_{17}]^{4+}$, $[Al_{13}(OH)_{34}]^{5+}$, existeraient, du moins momentanément, lorsque l'alun est injecté dans l'eau (Amirtharajah et Mills 1982; Snoeyink et Jenkins 1980; Tardat-Henry 1989). L'action initiale de la boue permettrait donc au coagulant d'agir plus efficacement sur la charge restante;

- l'ajout de boue plus tôt au procédé favoriserait un remplacement plus complet des ions hydroxydes (par les ions phosphates) au sein des précipités d'hydroxophosphates d'aluminium présents, laissant le coagulant agir par la suite sur la charge restante;
- la présence de la boue augmenterait le nombre de noyaux de coagulation servant à l'initiation (germination) des floccs, ce qui améliorerait les rendements.

À la lumière des résultats obtenus lors de la première phase de travaux (Monette *et al.* 1999), la seconde hypothèse semble, *a priori*, la plus plausible d'autant plus que la charge de l'eau brute employée est faible et que le pH se situe à près de 7,3. Les troisième et quatrième hypothèses demeurent toutefois également plausibles; peu de données s'opposent actuellement à la possibilité d'une action des espèces polycationiques ou à une substitution des hydroxydes par les phosphates au sein des précipités d'hydroxophosphates d'aluminium. Quant à la dernière hypothèse, sa véracité n'est pas évidente bien que difficile à réfuter complètement; une eau usée présente généralement amplement de noyaux pour amorcer la coagulation.

Par ailleurs, l'introduction de la boue après le coagulant a mené à des rendements assez comparables à ceux observés pour les essais témoins (sans recirculation) ce qui s'expliquerait par une déficience en adjuvant de floculation. Fait surprenant, cette déficience n'a pas semblé perturber la performance du procédé lorsque la boue a été introduite avant le coagulant. Ce résultat impliquerait alors que des

gains de rendements peuvent être escomptés, même en conditions de déficience, lorsque la boue est introduite avant l'ajout du coagulant. Une compensation adéquate en adjuvant de floculation en fonction de la masse de boues recirculées devrait par contre, en toute logique, amoindrir les écarts de rendements entre les deux lieux de recirculation.

À l'échelle d'une station d'épuration, ces résultats montrent que la boue devrait être ajoutée avant le coagulant afin de maximiser ses bienfaits. Cette séquence d'introduction de réactifs présente, entre autres, l'avantage d'assurer un mélange homogène de la boue avec l'eau brute avant l'ajout de l'adjuvant de floculation. En effet, la période de dispersion de la boue et son mécanisme de dispersion avaient été identifiés comme deux paramètres critiques à surveiller et à contrôler à plus grande échelle pour éviter des instabilités de traitement (Monette *et al.* 1999). Cette pratique est encore plus appropriée en conditions de forts débits alors que le temps de contact «réactifs : eau» est minimal. Cependant, l'introduction d'une boue avant l'injection du coagulant ne doit pas engendrer sa fragmentation (altération) en de plus fines particules qui pourraient décanter difficilement ou nécessiter une consommation supplémentaire de coagulant afin de les agglomérer.

Finalement, des gains d'efficacité plus importants devraient normalement être observés dans des conditions critiques de fonctionnement. Ces conditions correspondent notamment à celles rencontrées au printemps lors de la fonte des neiges (eaux diluées) alors que la température des eaux voisine parfois 6°C. Les cinétiques réactionnelles étant fortement ralenties à cette température, l'ajout de la boue en amont du procédé devrait favoriser une meilleure efficacité, particulièrement si le balayage constitue le mécanisme prédominant de coagulation.

3.2. ÉTUDE COMPARATIVE EN BÉCHERS (SÉRIE II)

3.2.1. Effet de la quantité de boues recirculées Les figures 2a et 2b présentent la relation entre la quantité de boues recirculées (mg-MES/L) et la concentration de MES et de phosphore total dans l'eau traitée. Les observations suivantes peuvent s'en dégager :

- les points initiaux de MES ou de phosphore total dans l'eau traitée (0 mg-MES/L) correspondent aux résultats des essais témoins sans ajout de boue. Autant pour les MES que pour le phosphore total, les concentrations résiduelles dans l'eau traitée diminuent en fonction de l'accroissement de la concentration de coagulant. Cette tendance, prévue, démontre la pertinence des concentrations de coagulant choisies pour ces essais;
- de manière générale, plus la quantité de boue ajoutée est importante, plus les concentrations de MES et de phosphore total dans l'eau traitée sont faibles. Plus précisément, plus la concentration de coagulant est faible, plus la boue contribue à l'abattement des MES et du phosphore total. À l'opposé, plus la concentration de coagulant est élevée, moins l'ajout de boue exerce une influence significative sur l'abattement des MES et du phosphore total. La comparaison des courbes A et D de chacune des figures permet de visualiser ce phénomène;
- à 0,5 mg/L, la concentration d'adjuvant de floculation ne semble pas limiter l'efficacité de la coagulation-floculation.

Les figures 2c et 2d présentent les résultats obtenus lorsque la concentration d'adjuvant de floculation se situe à 0,3 mg/L. D'abord, les courbes A et B de chacun des graphiques révèlent, dans l'ensemble,

des tendances similaires à celles des figures 2a et 2b. Ces résultats démontrent que la concentration d'adjuvant de floculation ne semble pas être limitative dans ces conditions. Cependant, l'analyse des courbes C et D témoignent de tendances différentes à celles observées aux figures 2a et 2b. La courbe C (figure 2c) décrit d'abord une chute rapide des MES suivie d'une remontée importante des valeurs. Pour le phosphore total (figure 2d), la chute initiale est lente et elle est suivie d'une légère remontée lorsque la concentration de boues recirculées atteint des valeurs plus élevées. Les courbes D (figures 2c et 2d) présentent, quant à elles, une augmentation continue de la concentration de MES et de phosphore total en fonction de la quantité de boue ajoutée. Bien que l'abattement initial (sans ajout de boue) soit supérieur aux autres concentrations de coagulant étudiées, l'allure des courbes D (2,4 mg- Al^{3+} /L) révèle une condition de déficience en adjuvant de floculation. Dans le cas des courbes C, et plus particulièrement celle tracée pour les MES (figure 2c), elles semblent décrire une situation de déficience partielle en adjuvant de floculation. Ces courbes correspondent à une condition intermédiaire entre les courbes B et D. Deux hypothèses peuvent être énoncées pour expliquer le comportement des courbes C et D des figures 2c et 2d :

- l'augmentation de la concentration de coagulant entraîne une augmentation des efficacités de traitement et inévitablement un accroissement de la quantité de micro-flocs formés (MES). Cet accroissement implique alors des besoins plus significatifs en adjuvant de floculation. La concentration de coagulant injectée étant de 4 à 8 fois plus importante pour la courbe D (2,4 mg- Al^{3+} /L) que pour les courbes A et B (0,3 mg- Al^{3+} /L et 0,6 mg- Al^{3+} /L), la qualité de l'eau traitée serait directement tributaire de la quantité de micro-flocs formés. L'ajout d'une concentration supérieure d'adjuvant de floculation (0,5 mg/L) a permis de remédier à cette situation (figures 2a

et 2b);

- une concentration trop importante de coagulant entraîne, pour les conditions spécifiques d'eau brute, une restabilisation des colloïdes (inversion des charges) menant à une détérioration de la qualité de l'eau traitée. Cette hypothèse, bien que possible, demeure improbable étant donné la nature de l'eau (solution colloïdale relativement concentrée), la présence de sulfates et de phosphates, la concentration du coagulant et le pH (7,3) de l'eau brute (Amirtharajah et Mills 1982).

Les résultats obtenus à l'échelle pilote (§ 3.3.) permettront de valider la première hypothèse. De toute évidence, l'analyse des résultats montre néanmoins la nécessité d'augmenter l'adjuvant de floculation à une valeur supérieure à 0,3 mg/L afin d'obtenir des rendements satisfaisants lorsque la quantité de boues recirculées dépasse 200 mg-MES/L. Pour les conditions d'essais et les concentrations de boues étudiées (jusqu'à 400 mg-MES/L), un ajout de 0,5 mg/L d'adjuvant de floculation semble suffisant pour éviter une dégradation de la qualité de l'eau lorsque la concentration de coagulant injectée est plus importante.

Globalement, les résultats obtenus montrent les effets bénéfiques d'une recirculation de boues. Ces effets s'avèrent d'autant plus importants que la concentration de coagulant ajoutée diminue et que le taux de recirculation augmente. Dans le cas présent, l'ajout de boue a conduit à des gains de rendements de 60%, 45%, 15% (MES) et 45%, 40%, 20% (phosphore total) pour des concentrations respectives de coagulant de 0,3, 0,6 et 1,2 mg- Al^{3+} /L. Les effets bénéfiques se sont ensuite estompés lorsque la concentration de coagulant a atteint 2,4 mg- Al^{3+} /L. À la lumière de ces résultats, la mise

en route d'une recirculation n'impliquerait pas de risques de dégradation de la qualité de l'eau lorsque la concentration d'adjuvant de floculation n'est pas limitative. Pour la turbidité et la demande chimique en oxygène (DCO), les tendances sont assez similaires. La présentation des figures correspondantes a donc été omise.

La figure 3a présente l'effet d'une augmentation de la quantité de boues recirculées sur le phosphore filtrable dans l'eau traitée pour une concentration d'adjuvant de floculation de 0,5 mg/L. L'analyse des résultats révèle que l'ajout de boue conduit à une élimination additionnelle de phosphore filtrable. Seule la courbe correspondant à une concentration de coagulant de 2,4 mg- Al^{3+} /L ne permet pas réellement d'obtenir un abattement supplémentaire de phosphore filtrable lorsque la quantité de boue est augmentée. À de plus faibles concentrations de coagulant (0,3 à 1,2 mg- Al^{3+} /L), chaque 100 mg-MES/L de boue ajoutée a permis un abattement de près de 0,08 mg-P/L de phosphore filtrable. Ces abattements seraient expliqués par des phénomènes de captage du phosphore filtrable par les floccs recirculés. Le gain de rendement associé à l'ajout de boue est marginal mais assure une réduction de la consommation de coagulant pour l'enlèvement du phosphore filtrable.

Le processus d'élimination du phosphore filtrable peut être expliqué ainsi. D'abord, la boue, introduite au procédé avant le coagulant, capte une fraction du phosphore filtrable initialement présent. Selon les résultats des travaux réalisés par Lefort (1995)¹, ce captage se produit rapidement dans les secondes qui suivent l'introduction de la boue au procédé. Par la suite, une certaine fraction du phosphore filtrable restant en solution réagit avec le coagulant, et ce, en fonction de sa

1. Cet auteur a démontré qu'une boue chimique urbaine (ferrique ou aluminique), ajoutée à des taux variant de 60 à près de 500 mg-MES/L, captait dès ses premières 30 secondes de contact une fraction importante du phosphore filtrable présent.

concentration injectée. Comme en témoigne les courbes de la figure 3a (0,3 à 1,2 mg- Al^{3+} /L), l'ajout combiné de boue et de coagulant permet un abattement plus important de phosphore filtrable par rapport une injection unique de coagulant. Toutefois, les résultats obtenus à une concentration de coagulant de 2,4 mg- Al^{3+} /L, illustré par une très faible pente (voire même nulle), démontrent que le coagulant doit nécessairement réagir à la fois avec le phosphore filtrable restant en solution et avec celui fraîchement capté par la boue. En effet, puisque les résultats obtenus à une très faible concentration de coagulant (0,3 mg- Al^{3+} /L) indiquent clairement que l'ajout de boue conduit à un abattement supplémentaire de phosphore filtrable, et que cet abattement n'est plus perceptible à une concentration de coagulant de 2,4 mg- Al^{3+} /L, le coagulant doit logiquement s'être approprié le phosphore filtrable préalablement capté par la boue. Par conséquent, une compétition existerait entre la réaction direct du phosphore filtrable avec le coagulant et celle de son captage par la boue recirculé ce qui valide l'hypothèse déjà avancée lors de précédents travaux (Monette *et al.* 1999). Ce résultat signifie également que le processus de captage du phosphore filtrable par la boue recirculée serait réversible et assujetti à la concentration de coagulant injectée (après l'ajout de boue).

Le raisonnement relatif au phosphore filtrable vaut également pour les autres paramètres analysés précédemment (MES, phosphore total, turbidité et DCO). L'action physique ou chimique de la boue seraient en compétition avec celle du coagulant, même lorsque celui-ci est ajouté après la boue. Le processus de captage, réversible et assujetti à la concentration de coagulant injectée, expliquerait l'atténuation des gains de rendements lorsque la concentration de coagulant augmente (figures 2a et 2b). Par conséquent, un temps de contact plus important de la boue (avant l'injection du coagulant) ne mènerait pas à un captage de polluants plus significatif. L'augmentation de la quantité de boue

favorisera assurément le processus de captage mais nécessitera néanmoins une compensation en adjuvant de floculation. Un compromis doit alors être recherché.

3.2.2. Effet de la concentration de coagulant Les figures 4a à 4d présentent, pour différentes quantités de boues recirculées et une concentration constante d'adjuvant de floculation (0,3 mg/L et 0,5 mg/L), la relation entre la concentration de coagulant injectée et les valeurs de MES ou de phosphore total dans l'eau traitée. Bien que ces courbes rejoignent celles présentées précédemment, elles permettent de mieux visualiser l'effet du coagulant sur les rendements épuratoires. Elles sont globalement représentatives de celles obtenues pour la turbidité et la DCO (résultats non-présentés). L'analyse des figures permet de dégager les constats suivants :

- la courbe supérieure de chacun des graphiques (courbe A) correspond aux essais témoins sans recirculation de boue. Elle sert donc de référence pour l'évaluation de la performance des essais avec recirculation;
- les courbes B, C et D des figures 4a et 4b témoignent de l'effet bénéfique de la recirculation de la boue (57, 228 et 400 mg-MES/L) lorsque la concentration d'adjuvant de floculation n'est pas limitative (0,5 mg/L). Les mêmes courbes, tracées aux figures 4c et 4d, montrent qu'à 0,3 mg/L la concentration d'adjuvant de floculation est déficiente. En effet, les courbes C et D annoncent une dégradation de la qualité de l'eau traitée, plus particulièrement dans le cas des MES (figure 4c), à partir d'une concentration de coagulant de près de 0,75 mg- Al^{3+} /L. La dégradation n'est pas aussi évidente dans le cas du phosphore total. Cette situation s'explique par le fait que la composante filtrable du phosphore masque la variation globale observée.

Tel que précisé précédemment, les gains associés à la recirculation sont plus appréciables lorsque la concentration de coagulant injectée est faible. À une concentration de 2,4 mg- Al^{3+} /L d'alun, le gain devient plutôt marginal. Ces résultats sont toutefois particuliers aux caractéristiques de l'eau employée et ne peuvent être extrapolés sans études complémentaires avec d'autres eaux usées.

Par ailleurs, la figure 3b présente les courbes de phosphore filtrable pour une concentration constante d'adjuvant de floculation (0,5 mg/L). Elles reflètent parfaitement celles obtenues lors des essais réalisés avec les trois autres concentrations d'adjuvant de floculation étudiées (0,3, 0,7 et 0,9 mg/L). Pour l'ensemble des données disponibles, les pentes approximatives associées aux taux de recirculation étudiés montrent une élimination de phosphore filtrable entre 0,25 mg et 0,40 mg par mg d' $\text{Al}(\text{III})$ ajouté. Les pentes les plus élevées concernent les essais témoins (sans recirculation) tandis que les plus faibles correspondent à un ajout de boue de 400 mg-MES/L. Ces droites tendent à se rejoindre pour une concentration de coagulant de 2,4 mg- Al^{3+} /L, valeur pour laquelle l'effet de la boue (captage) sur l'élimination du phosphore filtrable s'estompe aux dépens de la réaction du coagulant. Selon la tendance annoncée par cette figure, l'augmentation de la concentration de coagulant au delà de 2,4 mg- Al^{3+} /L mènera aux mêmes valeurs résiduelles de phosphore filtrable, peu importe la quantité de boues recirculées. Encore une fois, cette tendance supporte la thèse selon laquelle une compétition existerait entre la réaction directe du phosphore filtrable avec le coagulant et son captage par la boue.

3.2.3. Effet de la concentration d'adjuvant de floculation Dans l'ensemble, la concentration d'adjuvant de floculation a eu peu d'influence sur l'abattement des MES, du phosphore total, de la

turbidité et de la DCO. Ce résultat n'est pas étonnant et s'explique par le niveau d'échelle des essais (béchers) qui laisse peu de marge de manoeuvre quant au raffinement des effets reliés aux caractéristiques physiques des floccs et à leurs vitesses de décantation. Or, celles-ci dépendent fortement de la concentration d'adjuvant de floculation et surtout, dans le cas présent, de la profondeur d'eau et de la durée de décantation. Seuls les essais conduits à 0,3 mg/L d'adjuvant de floculation ont abouti, dans certains cas, à une dégradation de la qualité de l'eau en raison d'une déficience en adjuvant de floculation. Ces conditions problématiques sont spécifiques à des ajouts plus importants de boue (228 et 400 mg-MES/L) et de coagulant (1,2 et 2,4 mg- Al^{3+} /L). Les figures 5a et 5b illustrent l'effet de l'ajout de l'adjuvant de floculation sur l'abattement des MES et du phosphore total pour différentes concentrations de coagulant (ajout de boue constant à 400 mg-MES/L). Ces figures révèlent la nécessité d'ajouter une concentration minimale de l'ordre de 0,5 mg/L d'adjuvant de floculation dans de telles conditions. Au delà de 0,5 mg/L, les effets se traduisent soit par des gains marginaux, soit par une dégradation de la qualité de l'eau traitée (faibles concentrations de coagulant). Cette dégradation s'explique par la formation de floccs filamenteux, qui présentent de moins bonnes propriétés de décantation, lorsque l'adjuvant de floculation est ajouté en excès.

En ce qui a trait au phosphore filtrable, son élimination s'est avérée indépendante de la concentration d'adjuvant de floculation. Ce résultat était prévu puisque le rôle de l'adjuvant de floculation consiste à assurer le pontage physique des micro-floccs ou des floccs déjà formés et non pas des matières filtrables (ou solubles).

3.3. ÉTUDE COMPARATIVE À L'ÉCHELLE PILOTE (SÉRIE III)

Les figures 6a à 6d illustrent, pour chacune des deux concentrations de coagulant étudiées (1,2 et 2,4 mg- Al^{3+}/L) et pour les prises² d'échantillonnage 1 et 3 des réacteurs pilotes de coagulation-floculation, l'évolution des MES résiduelles en fonction de la concentration d'adjuvant de floculation. La comparaison des résultats entre les deux prises d'échantillonnage permet de bien mettre en évidence les effets de vitesses de décantation des floes formés. Les figures 7a à 7d présentent, pour des conditions similaires, les valeurs résiduelles de phosphore total. Puisque les résultats de turbidité et de DCO ont également révélé des tendances similaires, leur présentation a été omise.

Dans l'ensemble, les essais à l'échelle pilote ont permis de confirmer et préciser la plupart des conclusions tirées lors des essais en béchers (§ 3.2.). L'interprétation des résultats permet d'en faire ressortir les éléments suivants :

- la recirculation de boues présente des avantages plus particulièrement à de faibles concentrations de coagulant (1,2 mg- Al^{3+}/L) et lorsque la concentration d'adjuvant de floculation n'est pas limitatives. L'examen des figures 6c et 6d ainsi que 7c et 7d permet d'en témoigner. À 1,2 mg- Al^{3+}/L et à une concentration d'adjuvant de floculation de 0,5 mg/L, les gains de rendements (moyenne des trois prises) s'établissent respectivement à 11 mg/L et 0,60 mg-P/L pour les MES et le phosphore total, soit des abattements supplémentaires de l'ordre de 15% et 25%. À une concentration de coagulant de 2,4 mg- Al^{3+}/L , les bénéfices de la recirculation sont nettement moins

2. Prise 1: supérieure; Prise 3 : inférieure. N. B. : la prise 3 est représentative des résultats obtenus à la prise 2.

importants et ne se révèlent que lorsque la concentration d'adjuvant de floculation atteint 0,6 mg/L.

Ces résultats confirment parfaitement ceux obtenus lors des essais en béchers;

- la concentration de coagulant de 2,4 mg- Al^{3+} /L nécessite un ajout supplémentaire d'adjuvant de floculation afin d'éviter toute dégradation de la qualité de l'eau traitée et d'assurer des gains de rendements. La comparaison des figures 6c et 6d (ou 7c et 7d) met en évidence les différences d'efficacité entre les courbes associées aux deux concentrations de coagulant étudiées (1,2 et 2,4 mg- Al^{3+} /L). De toute évidence, l'augmentation de la concentration de floes, occasionnée par une plus forte concentration de coagulant, contribue à l'accroissement des besoins en adjuvant de floculation. De plus, l'adjuvant de floculation pourrait s'avérer moins apte à «adhérer» aux floes (MES) formés par réactions directes du coagulant. Ces floes, contrairement à ceux pré-formés et recirculés, ne contiennent aucun résidu d'adjuvant de floculation. Les effets d'une déficience en adjuvant de floculation ont également été observés à la prise 2 mais uniquement dans le cas du phosphore total. Un prolongement de la période de décantation pourrait donc contribuer à amenuiser les effets négatifs associés à l'injection de plus fortes concentrations de coagulant;
- la comparaison des résultats obtenus en fonction de la profondeur des prises d'échantillonnage révèle l'importance d'un choix judicieux de concentration d'adjuvant de floculation pour bénéficier de la recirculation. Comparativement aux essais en béchers, qui offrent peu de sensibilité quant à l'évaluation des effets de balayage, l'influence de la concentration d'adjuvant de floculation s'est avérée nettement plus prépondérante. Les valeurs résiduelles élevées (figures 6c, 6d, 7c et 7d), voire supérieures à celles de l'eau brute lorsque la concentration d'adjuvant de floculation est inférieure à 0,6 mg/L, signifient qu'une carence en adjuvant de floculation (ou une durée de décantation insuffisante) mènera inévitablement à une dégradation des performances du procédé.

Une fois les besoins en adjuvant de floculation comblés, les performances se stabilisent rapidement et demeurent peu influencées par l'excédent d'adjuvant de floculation. Compte tenu des résultats, pour une recirculation au taux de 200 mg-MES/L, des concentrations de l'ordre de 0,5 mg/L et de 0,7 mg/L semblent satisfaisantes lorsque le coagulant est injecté à des taux respectifs de 1,2 et 2,4 mg- Al^{3+} /L;

- les gains de rendements associés à la recirculation augmentent en fonction de la profondeur d'eau des colonnes d'essais. Cette situation s'explique d'une part, par les propriétés avantageuses des floes formés (tailles, vitesse de décantation) et d'autre part, par une amélioration du processus de balayage en raison de la concentration élevée de floes et de leur agglomération au cours de leur décantation;
- les résultats obtenus à la prise 1 (figures 6a, 6b, 7a et 7b) n'expriment pas de manière aussi évidente les avantages associés à la recirculation. Deux raisons expliquent cette situation. D'une part, le balayage de l'eau ne se produit pas aussi intensément près de la surface de l'eau (prise 1 : 0,20 m de profondeur) puisque les floes ont tendance à chuter rapidement dès le début de la période de décantation. D'autre part, ce type d'essais pilotes entraîne parfois des problèmes de remontée de floes (micro-flottation), ce qui entraîne une légère détérioration de la qualité de l'eau traitée. Ce problème est d'ailleurs à l'origine des mauvais rendements observés lors des essais de recirculation présentés à la figure 6b.

En ce qui concerne l'abattement du phosphore filtrable par la boue, les résultats obtenus (tableau 3) permettent de confirmer les conclusions précédemment tirées lors des essais en béchers. D'abord, tel que prévu, l'enlèvement du phosphore filtrable a été totalement indépendant de la concentration

d'adjuvant de floculation ajoutée (0,3 à 0,9 mg/L). Pour cette raison, le tableau 3 présente les valeurs de phosphore filtrable correspondant aux moyennes des quatre concentrations d'adjuvant de floculation étudiées, allant de 0,3 à 0,9 mg/L. Comme en témoigne les valeurs indiquées, peu de variations ont été observées quant à l'élimination du phosphore filtrable en fonction de la profondeur des prises d'échantillonnage. Seuls les résultats obtenus à un taux de recirculation de 200 mg-MES/L et à une concentration de coagulant de 1,2 mg- Al^{3+} /L montrent une certaine diminution du phosphore filtrable.

Par ailleurs, la recirculation à un taux de 200 mg-MES/L, jumelée à une faible concentration de coagulant (1,2 mg- Al^{3+} /L), a conduit à une élimination supplémentaire moyenne de 0,23 mg-P/L, soit 18% du phosphore filtrable. Chaque 100 mg-MES/L de boue a contribué à un abattement moyen de près de 0,11 mg-P/L de phosphore filtrable. Cette valeur rejoint celle calculée précédemment (0,08 mg-P/100 mg-MES) obtenue avec une eau usée de caractéristiques différentes. À une plus forte concentration de coagulant (2,4 mg- Al^{3+} /L), les gains de rendements se sont également estompés pour devenir plutôt marginaux, soit de l'ordre de 0,04 mg-P/L. De plus, la contribution du coagulant à l'abattement du phosphore filtrable décroît avec l'augmentation de la concentration de boues recirculées. En effet, des éliminations de 0,24 mg et 0,40 mg de phosphore filtrable par mg d'aluminium(III) ont été respectivement observées pour les essais de recirculation (200 mg-MES/L) et les essais témoins (sans recirculation). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues lors des essais en béchers. L'ensemble de ces résultats confirment ainsi la capacité du coagulant à s'accaparer le phosphore filtrable aux dépens de la boue (compétitivité), bien que cette boue ait été ajoutée avant le coagulant.

En résumé, les résultats démontrent que la recirculation s'avère d'autant plus avantageuse que la concentration de coagulant injectée est faible et que les besoins en adjuvant de floculation sont comblés. Les essais de recirculation conduits tant en béchers qu'à l'échelle pilote, jumelés aux essais témoins, ont permis de démontrer que la boue recirculée participe réellement au traitement. Les résultats obtenus aux trois prises d'échantillonnage ont clairement démontré la nécessité d'ajuster la concentration d'adjuvant de floculation en fonction de la masse de boue mise en jeu afin d'assurer des conditions de décantation optimales. Dans cette optique, l'ajustement de sa concentration à grande échelle devra être réalisé de manière à éviter toute déficience qui entraînerait une dégradation de la qualité de l'eau traitée. Le taux d'adjuvant de floculation dépendra entre autres des infrastructures en place, de la mise en oeuvre des réactifs chimiques, des effets hydrauliques (qui peuvent conduire au cisaillement des flocs) et surtout, du flux massique de recirculation. Le choix de la concentration d'adjuvant de floculation sera d'ailleurs directement tributaire de la qualité du contrôle de ce flux massique.

3.4. ASPECTS ÉCONOMIQUES

Une comparaison entre les essais témoins et ceux intégrant une recirculation peut être réalisée afin d'évaluer les coûts associés à l'utilisation des réactifs. L'évaluation a été réalisée en considérant que l'alun commercial se détaille à 100 \$CAN/tonne liquide (8,3% d' Al_2O_3) et le *Percol 902* à 3,80 \$CAN/kg. Elle est menée suivant des objectifs de traitement arbitraires de 20 mg/L (MES) et de 1,0 mg-P/L (phosphore total) dans l'eau traitée. Les autres paramètres de qualité de l'eau n'ont pas été considérés lors des calculs. À noter que cette évaluation est directement tributaire des prix de

marché des produits chimiques et des conditions particulières d'essais (échelles, eaux brutes, etc.).

D'abord, les coûts de traitement de l'eau usée estimés à partir des essais conduits en béchers (§ 3.2.) s'élèvent approximativement à 0,0052 \$CAN/m³ pour une coagulation-floculation classique³ et à 0,0030 \$CAN/m³ lorsqu'une boue est recirculée⁴, soit une économie de près de 40%. Dans le cas présent, l'enlèvement du phosphore total s'est avéré nettement plus contraignant que celui des MES quant aux besoins en produits chimiques pour atteindre les objectifs fixés. L'objectif a été atteint aisément pour les MES, dès que la quantité de boues recirculées surpassait 100 mg-MES/L (figure 2a) et sans que la concentration de coagulant et d'adjuvant de floculation excède 0,3 mg-Al³⁺/L et 0,5 mg/L respectivement. À titre de comparaison, lorsque les MES sont considérées comme paramètre de qualité, les coûts de traitement s'élèvent à près de 0,0037 \$CAN/m³ pour une coagulation-floculation classique⁵ et à moins de 0,0018 \$CAN/m³ avec recirculation⁶, soit une économie de plus de 50%. Les différences de coûts s'expliquent par le fait que 65% du phosphore est sous forme filtrable (1,53 mg-P/L). Comme en témoignent les figures 3a et 3b, l'enlèvement du phosphore filtrable dépend directement de l'ajout du coagulant et s'élimine difficilement par un mécanisme de balayage qui est, quant à lui, grandement favorisé par l'apport de boues recirculées comme le montre l'abattement plus aisé des MES (figures 4a et 4c).

À l'échelle pilote (§ 3.3.), la même évaluation effectuée en considérant la moyenne des résultats aux trois prises d'échantillonnage, permet de conclure que le coût de traitement s'élève

3. Alun : 1,8 mg-Al³⁺/L; *Percol 902* : 0,30 mg/L; boue : aucune; paramètre contraignant : phosphore total.

4. Alun : 0,5 mg-Al³⁺/L; *Percol 902* : 0,50 mg/L; boue : 400 mg-MES/L; paramètre contraignant : phosphore total.

5. Alun : 1,1 mg-Al³⁺/L; *Percol 902* : 0,30 mg/L; boue : aucune.

6. Alun : < 0,3 mg-Al³⁺/L; *Percol 902* : 0,50 mg/L; boue : > 100 mg-MES/L.

approximativement à 0,0077 \$CAN/m³ pour une coagulation-floculation classique⁷ et à 0,0070 \$CAN/m³ lorsqu'une boue est recirculée⁸, soit une économie de l'ordre de 10%. Contrairement aux essais en béchers, les besoins en produits chimiques ont été dictés par les MES (paramètre contraignant) ce qui s'avère surprenant compte tenu des effets d'entrappage et de balayage importants lors d'un essai en colonne. À titre comparatif, lorsque le phosphore total est considéré comme paramètre de qualité, les coûts de traitement sont estimés à près de 0,0069 \$CAN/m³ pour une coagulation-floculation classique⁹ et à 0,0058 \$CAN/m³ avec recirculation¹⁰, soit une économie de l'ordre de 15%. Les avantages économiques moins éloquents associés à la recirculation à l'échelle pilote s'expliquent principalement par la faible concentration de boues recirculées (200 mg-MES/L) qui n'a pas permis, comparativement aux essais en béchers (400 mg-MES/L), une grande expression de l'effet filtrant (balayage) des floes formés. Par ailleurs, bien que l'ajout d'une plus grande quantité de boue nécessite une concentration accrue d'adjuvant de floculation, elle conduit à une diminution significative de la quantité requise de coagulant. Quant à l'effet filtrant, il repose sur la quantité de floes présents qui dépend directement du taux de recirculation appliqué. De plus, dans une moindre mesure, la courte période allouée à la décantation (10 minutes) a probablement contribué à désavantager le processus de recirculation, plus particulièrement à de plus faibles concentrations d'adjuvant de floculation.

En résumé, les résultats obtenus lors de cette étude laissent croire que la recirculation peut être économiquement avantageuse à grande échelle à condition d'ajuster adéquatement les concentrations

7. Alun : 2,4 mg-Al³⁺/L; *Percol 902* : 0,60 mg/L; boue : aucune; paramètre contraignant : MES.

8. Alun : 1,9 mg-Al³⁺/L; *Percol 902* : 0,70 mg/L; boue : 200 mg-MES/L; paramètre contraignant : MES.

9. Alun : 2,3 mg-Al³⁺/L; *Percol 902* : 0,45 mg/L; boue : aucune.

10. Alun : 1,4 mg-Al³⁺/L; *Percol 902* : 0,70 mg/L; boue : 200 mg-MES/L.

de réactifs (coagulant, adjuvant de floculation, boue). En première approximation, les résultats obtenus en béchers montrent que la recirculation à des taux de 200 à 250 mg-MES/L et de 300 à 400 mg-MES/L contribue à diminuer les besoins en coagulant de 1 mg- Al^{3+} /L pour les abattements respectifs des MES et du phosphore total. À ces taux de recirculation, la concentration d'adjuvant de floculation doit toutefois être augmentée de 0,2 à 0,3 mg/L par rapport à celle requise dans un système de coagulation-floculation classique. Ainsi, pour une station d'épuration opérant normalement à des concentrations respectives d'alun et d'adjuvant de floculation (*Percol 902*) de 4,0 mg- Al^{3+} /L et de 0,35 mg/L, des économies de l'ordre de 10% peuvent être espérées si les boues sont recirculées au taux de 300 à 400 mg-MES/L. De plus, l'augmentation de la concentration d'adjuvant de floculation pourra avoir des répercussions positives sur l'épaississement des boues et sur leur conditionnement (Monette *et al.* 1999). L'évaluation globale du procédé devrait alors tenir compte des économies potentielles reliées à la filière solide.

3.5. SYNTHÈSE

3.5.1. Tendances des résultats Les figures 8a et 8b synthétisent les tendances observées lors des essais réalisés en béchers et à l'échelle pilote. Les courbes tracées supposent une concentration d'adjuvant de floculation constante et non-limitative (sauf indication contraire) ainsi qu'une période de décantation appropriée.

D'abord, la figure 8a témoigne de l'effet d'une augmentation de la quantité de boues recirculées sur la fraction éliminée de polluant (phosphore total, MES, turbidité, DCO). Chacune des courbes est

représentative d'une concentration donnée de coagulant qui augmente progressivement de A vers B ($A \Rightarrow B$). Les points initiaux indiqués en abscisse (1) servent de repères puisqu'ils correspondent aux abattements observés par une coagulation-floculation classique (sans recirculation). L'examen des tendances présentées par les courbes démontre que la boue contribue d'autant plus au processus épuratoire que la concentration de coagulant diminue. En tenant compte qu'une simple décantation permet d'éliminer une certaine fraction des polluants non-filtrables ($\uparrow 2$), les gains escomptés ($G\%$) à une faible concentration de coagulant (courbe supérieure) sont particulièrement significatifs. Toutefois, au fur et à mesure de l'augmentation de la concentration de coagulant ($A \Rightarrow B$), ces gains s'estompent peu à peu en raison de l'action préférentielle du coagulant sur les polluants aux dépens de celle de la boue (compétitivité) et se traduisent même par une dégradation de la qualité de l'eau (4). Cette dégradation s'explique d'une part, par l'accroissement de la concentration de micro-flocs formés par une forte concentration de coagulant et, d'autre part, par une déficience en adjuvant de floculation. Un ajout supplémentaire d'adjuvant de floculation permet alors de remédier à cette situation (4 \Rightarrow 5).

Par ailleurs, la figure 8b montre, pour une concentration d'adjuvant de floculation constante et non-limitative, l'effet d'une augmentation de la concentration de coagulant sur la fraction éliminée de polluant. D'abord, la courbe 1 illustre la tendance générale observée lorsque la coagulation-floculation est conduite sans recirculation. Cette courbe se déplace ensuite selon $C \Rightarrow D$ lorsque la concentration de boues recirculées augmente. À nouveau, les gains de rendements ($G\%$) sont d'autant plus importants que la concentration de coagulant diminue et que celle de la boue augmente. Les gains deviennent ensuite similaires à de fortes concentrations de coagulant en raison de l'action

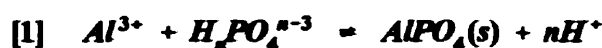
préférentielle du coagulant sur les polluants aux dépens de celle de la boue. Tout comme à la figure 8a, une dégradation de la qualité de l'eau peut être observée lorsque la quantité d'adjuvant de floculation devient déficiente (4).

Des courbes similaires pourraient également être tracées pour le phosphore filtrable. Elles présenteraient toutefois une tendance générale plus linéaire. Cette tendance s'explique par le fait que l'élimination du phosphore filtrable, par opposition à celle du phosphore total, dépend essentiellement de l'action directe du coagulant (réaction) et de la boue (captage). Les pentes les plus abruptes seraient alors observées à de faibles concentrations de coagulant (figure 8a) et à de faibles concentrations de boue (figure 8b).

3.5.2. Mécanismes de coagulation-floculation Plusieurs mécanismes de coagulation-floculation entrent en jeu simultanément, consécutivement ou de manière compétitive, lors du processus d'épuration des eaux usées. Les résultats de la première phase de travaux (Monette *et al.* 1999) ont permis de désigner l'entrappage («*enmeshment*») et le balayage («*sweep flocculation*») comme les principaux mécanismes responsables des rendements obtenus lorsqu'une boue est recirculée. Certes, la forte concentration de flocs ainsi que leur taille considérable assure un balayage et une filtration du liquide conduisant à un entrappage plus efficace des impuretés présentes. Par ailleurs, tel que démontré par les figures 8a et 8b, les contributions respectives du coagulant et de la boue aux gains de rendements ne s'additionnent pas l'un à l'autre. Par exemple, à une forte concentration de coagulant, la contribution de la boue devient minime contrairement à celle observée à faible concentration de coagulant (figure 8a). La notion de compétition, nullement abordée par la

documentation scientifique, entre alors en jeu.

Le cas de l'élimination des phosphates en solution peut être présenté à titre d'exemple. Aux pH habituels en épuration des eaux usées, la co-précipitation de $AlPO_4(s)$ et $Al(OH)_3(s)$ se produit inévitablement. Toutefois, selon Snoeyink et Jenkins (1980), les phosphates auraient plutôt tendance à s'adsorber ou à s'incorporer au précipité de $Al(OH)_3(s)$ pour former une phase solide de nature amorphe, l'hydroxophosphate d'aluminium. Les réactions de base peuvent se résumer ainsi :

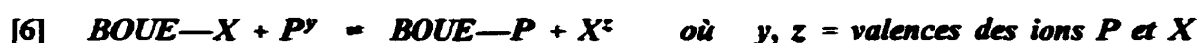


Le précipité d'hydroxophosphate d'aluminium (équation [3]) qui compose, du moins en partie, la boue produite lors du processus épuratoire, posséderait une capacité de substitution des hydroxydes (Jenkins *et al.* 1971, Stumm et Morgan 1962) par des phosphates. La réaction générale de substitution, qui tend à diminuer le ratio OH^-/PO_4^{3-} au sein du précipité d'hydroxophosphate d'aluminium tout en conservant l'électro-neutralité du complexe, serait la suivante :



Pour une valeur de x se situant entre 0 et 1, celle de $(m-3x)$ tendrait vers 0 suite à des recirculations successives de la boue. L'élimination de polluants autres que les phosphates en solution (phosphore

non filtrable, MES, turbidité, DCO) n'est toutefois pas nécessairement régie par ce même genre de réaction de substitution au sein d'un complexe. Deux équations générales peuvent être formulées, sous une forme simplifiée, pour visualiser le processus d'élimination des polluants :



L'équation [5] réfère aux mécanismes de captage considérés au sens très large (adsorption, complexation, etc.), ainsi qu'à ceux de balayage et d'entrappage. Le lien $BOUE-P$ est présenté à titre représentatif puisque les forces retenant les polluants au sein de la boue sont probablement de nature plus physique que chimique. L'équation [6] réfère au processus général d'échanges d'ions. Quoique moins spécifique, elle présente une forte similitude avec l'équation [4].

Les courbes synthèses tracées aux figures 8a et 8b laissent supposées que les liens $BOUE-P$ ou PO_4^{3-} —hydroxophosphate d'aluminium sont précaires puisque l'ajout de coagulant, après la boue, conduit à une réduction considérable des bénéfices associés à la recirculation. En d'autres mots, le coagulant s'accaparerait les impuretés initialement captées par la boue pour compléter sa réaction et aboutir à un composé plus stable chimiquement. Les «réactions» formulées par les équations [4], [5] ou [6] seraient par conséquent fortement réversibles. Les cinétiques réactionnelles des réactions de réversibilité seraient d'ailleurs dictées par celles du coagulant. À en juger par les résultats, elles seraient très rapides. Dans le cas particulier du phosphore filtrable, Lefort (1995) a démontré que son captage par la boue présenterait effectivement une cinétique rapide. Jenkins *et al.* (1971)

précisent, quant à eux, que la réaction entre les phosphates et le coagulant (équation [1]) est très rapide, voire plus rapide que la réaction menant à la formation d'hydroxydes d'aluminium (équation [2]). Dans cette optique, la cinétique de réversibilité réactionnelle de captage du phosphore filtrable par la boue est probablement très rapide puisqu'elle serait dictée par celle découlant de la réaction directe du coagulant avec les phosphates.

En résumé, la facilité avec laquelle le coagulant s'accapare des impuretés aux dépens de la boue laisse présumer que l'association *BOUE—P* n'est pas solide et que le mécanisme d'action de la boue est nettement plus physique que chimique. Le coagulant présent au sein de la boue ne possède pas de pouvoir résiduel très apparent. Cette situation est tout de même surprenante compte tenu qu'Amirtharajah et Mills (1982) précisent que le précipité de $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ présente normalement une charge positive lorsque le pH se situe entre 7 et 8 unités. La recirculation d'un tel précipité aurait dû, en toute logique, contribuer chimiquement au processus de traitement. Par contre, l'effet de la charge est probablement difficile à percevoir. À la lumière des résultats obtenus, les mécanismes généraux prédominants, qui conduisent à une amélioration des rendements par rapport à un système classique, seraient de prime abord l'entrappage et le balayage. L'adsorption doit également être considérée, mais dans une moindre mesure.

En ce qui concerne le phosphore filtrable, les résultats obtenus ne contredisent pas les effets d'incorporation ou de substitution formulé par les équations [3] ou [4], bien que le processus d'adsorption doive également être présumé. Toutefois, puisque la recirculation ne contribue pas à un abattement supplémentaire de phosphore filtrable lorsque la concentration de coagulant est plus

importante, le lien assurant la complexation du phosphore au sein du précipité d'hydroxophosphate d'aluminium est nécessairement plus précaire que celui existant au sein d'un précipité tel que AlPO_4 . Dans cette même perspective, la désorption du phosphore filtrable semble également facile à réaliser.

4. CONCLUSIONS

Cette étude visait d'abord à mieux comprendre l'influence de chacun des réactifs ajoutés, le coagulant, l'adjuvant de floculation et la boue, sur le processus de coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques. De plus, elle cherchait à préciser le lieu d'introduction optimal de la boue et à améliorer le niveau de connaissance des mécanismes de coagulation-floculation. Pour atteindre les objectifs fixés, trois séries d'essais ont été menés en laboratoire (bêchers) et l'échelle pilote. Elles ont permis de comparer directement les résultats du procédé de recirculation de boues avec ceux d'une coagulation-floculation classique. Les conclusions générales suivantes se dégagent de l'ensemble de cette étude :

- la boue recirculée participe favorablement au processus de coagulation-floculation. Par rapport aux essais témoins (sans recirculation), les gains de rendements découlant de l'ajout de boue sont meilleurs pour de faibles concentrations de coagulant et lorsque que la concentration d'adjuvant de floculation n'est pas limitative. À l'inverse, plus la concentration de coagulant est élevée, moins l'ajout de boue exerce une influence significative sur les rendements finaux obtenus. Ces tendances ont été observées pour les MES, le phosphore total, la turbidité, la DCO et le phosphore filtrable. L'abattement du phosphore filtrable s'est cependant avéré totalement indépendant de la

concentration d'adjuvant de floculation injectée;

- à une concentration constante de coagulant, un accroissement de la concentration de boues recirculées contribue à une amélioration des rendements épuratoires, pourvu que les besoins en adjuvant de floculation soient comblés. En pratique, un taux de recirculation supérieur à 300 mg-MES/L est souhaitable pour tirer profit de la recirculation. Ce taux de recirculation devrait nécessiter une concentration d'adjuvant de floculation de l'ordre de 0,2 à 0,3 mg/L supérieure à celle d'un système de coagulation-floculation classique;
- l'action physique ou chimique de la boue serait en compétition avec celle du coagulant, même lorsque celui-ci est ajouté après la boue. Le «captage» de polluants par la boue serait même un processus fortement réversible et assujéti à la concentration de coagulant injectée, ce qui expliquerait l'atténuation des gains de rendements lorsque la concentration de coagulant augmente. Dans cette perspective, un temps de contact plus important de la boue avec l'eau usée avant l'injection du coagulant ne mènerait pas à de gains particuliers;
- les principaux mécanismes d'action de la boue lors du processus d'épuration des eaux usées seraient l'entrappage et le balayage;
- une carence en adjuvant de floculation mène inévitablement à une dégradation des performances du procédé de coagulation-floculation avec recirculation. À grande échelle, le choix de sa concentration dépendra des infrastructures en place, de la mise en oeuvre des réactifs chimiques, des phénomènes hydrauliques et surtout du flux massique de recirculation;
- les besoins en adjuvant de floculation, en plus d'évoluer avec le taux de recirculation appliqué, augmente de manière significative avec l'accroissement de la concentration de coagulant en raison de la quantité de flocs formés. L'adjuvant de floculation serait moins apte à agglomérer des flocs

(MES) formés par réactions directes du coagulant avec les polluants;

- tel qu'anticipé, les meilleurs rendements sont obtenus lorsque la boue est introduite en amont du lieu d'injection du coagulant et de l'adjuvant de floculation. Les résultats obtenus en béchers ont en effet révélé des gains de rendements de l'ordre de 30% quant aux abattements de MES, de turbidité et de phosphore total.

Afin de diminuer les frais associés à l'achat de réactifs chimiques dans une station d'épuration, la meilleure stratégie consistera à réduire la concentration de coagulant et d'augmenter celle de l'adjuvant de floculation, tout en maintenant un flux massique de boue suffisant. Les résultats obtenus laissent d'ailleurs entrevoir des économies de l'ordre de 10% si le taux de recirculation est supérieur à 300 mg-MES/L. Les gains dépendront notamment des infrastructures en place et de la concentration de coagulant employée. L'évaluation globale du procédé devra également tenir compte des économies potentielles reliées à la filière solide. L'augmentation du taux de recirculation au delà de 300 mg-MES/L est souhaitable lors d'éventuels essais à grande échelle afin de vérifier si des gains supplémentaires de rendements sont possibles. Toutefois, un taux de recirculation exagérément élevé, en plus de conduire à une augmentation importante de la concentration d'adjuvant de floculation, risquera d'accroître l'âge de la boue et son degré de maturation. Cette maturation, notamment en conditions estivales, pourrait contribuer à une détérioration notable de la qualité de l'eau traitée.

Finalement, la concentration d'adjuvant de floculation devra en tout temps être ajustée en fonction du flux massique de boue. Cette pratique évitera toute situation de déficience qui mènerait,

inévitablement, à des problèmes de décantation de floccs ou à une dégradation de la qualité de l'eau traitée. Le flux massique de boue constitue un paramètre déterminant du procédé qui nécessitera un suivi et un contrôle particulier. À cet égard, le développement d'un outil indicateur de fonctionnement simple et efficace du procédé devra être privilégié.

REMERCIEMENTS

L'auteur principal tient à remercier le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF), par le biais du Fonds de recherche et de développement technologique en environnement, pour son support financier. Cette étude s'inscrivait au volet 3 des orientations stratégiques du MEF portant sur la recherche et le développement de procédés de récupération et de revalorisation des sels métalliques. Des remerciements doivent également être adressés au personnel du *Centre d'épuration Rive-Sud* pour leur étroite collaboration ainsi qu'au Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) et au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) pour leur soutien financier.

BIBLIOGRAPHIE

American Public Health Association, American Water Works Association, et Water Environment Federation 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19^e éd. *Éditeurs* : American Public Health Association. Washington, D.C. 1 108 p.

Amirtharajah, A., et Mills, K.M. 1982. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *Journal of the American Water Works Association*, 74(4) : 210-216.

Evers, R.H. 1973. Advanced wastewater treatment techniques for removing nitrogen and phosphorus. *Water and Sewage Works*, Reference Number : 15-19, 134-137.

Jenkins, D., Ferguson, J.F., et Menar, A.B. 1971. Chemical processes for phosphate removal. *Water Research*, 5(7) : 369-389.

Lanham, R.M., Tsai, K.-C., et Hubbs, S.A. 1984. Recycling of preformed alum sludge in the coagulation process. *Proceedings - American Water Works Association Annual Conference 1984*. Denver, CO. pp. 491-506.

Lefort, M. 1995. Enlèvement du phosphore filtrable des eaux usées par l'intégration de la recirculation des boues chimiques au procédé de coagulation-floculation. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal. 96 p.

Monette, F., Brière, F.G., Létourneau, M., Duchesne, M., et Hausler, R. 1999. Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : performance générale et stabilité du procédé. *Soumis à la Revue canadienne de génie civil*. 52 p.

Monteith, H.D., et Baldwin, W.W. 1974. Phosphate removal using waste alum sludge from water

purification. Royal Military College of Canada. Civil Engineering Research Report CE 74-1. 76 p.

Snoeyink, V.L., et Jenkins, D. 1980. Water chemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York. 463 p.

Stepko, W.E. 1976. Phosphorus removal demonstration studies at C.F.B. Trenton, Phase II (alum addition optimization). Technology Development Report EPS 4-WP-76-4 (Environmental Protection Service). 33 p.

Stumm, W., et Morgan, J.J. 1962. Chemical aspects of coagulation. Journal of American Water Works Association, **54**(8) : 971-992.

Stumm, W., et Morgan, J.J. 1996. Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters. 3^e éd. John Wiley & Sons, Inc, New York. 1022 p.

Tardat-Henry, M. 1989. Évolution des dérivés de l'aluminium utilisés comme agents coagulants. Sciences et techniques de l'eau, **22**(4) : 297-304.

Thomas, E.A. 1972. Phosphate removal by recirculating iron sludge. Journal of the Water Pollution and Control Federation, **44**(2) : 176-182.

LISTE DES SYMBOLES

AF	adjuvant de floculation
CÉRS	Centre d'épuration Rive-Sud
DCO	demande chimique en oxygène
MES	matières en suspension
P filtrable	phosphore filtrable
P total	phosphore total

Tableau 1. Protocole d'essais de coagulation-floculation avec recirculation de boues (bêchers).

Phase du protocole	Activité	Durée de l'activité
1. Préparatifs	1. Agitation des eaux usées	Quelques minutes
	2. Remplissage de chacun des bêchers avec 2 L d'eau usée	Quelques minutes
2. Injection des produits chimiques	1. Ajustement de la vitesse d'agitation pour maintenir un gradient de vitesse (G) de 220 s^{-1}	Quelques minutes
	2. Introduction de la boue	Quelques secondes
	3. Temps d'attente assurant la dispersion de la boue	1 minute
	4. Injection du coagulant	Quelques secondes
	5. Temps d'attente assurant la dispersion du coagulant	1 minute
	6. Injection de l'adjuvant de floculation	Quelques secondes
	7. Temps d'attente assurant la dispersion de l'adjuvant de floculation	1 minute
	8. Ajustement de la vitesse d'agitation pour maintenir un gradient de vitesse (G) de 20 s^{-1}	Quelques secondes
3. Agitation et décantation	1. Maintien du gradient de vitesse (G) à 20 s^{-1}	5 minutes
	2. Arrêt de l'agitation	Quelques secondes
	3. Période de décantation	3 minutes
	4. Purge des prises d'échantillonnage	Quelques secondes
	5. Prélèvement des échantillons d'eau	Quelques secondes

Tableau 2. Combinaisons des concentrations de réactifs étudiés (SÉRIES I et II).

Réactifs injectés	Unités	Concentrations étudiées de chacun des réactifs	
		SÉRIE I	SÉRIE II
		Essais en béchers	Essais avec les réacteurs pilotes
Coagulant (alun)	mg-Al ³⁺ /L	0,3	
		0,6	1,2
		1,2	2,4
		2,4	
Adjuvant de floculation (Percol 902)	mg/L	0,3	0,3
		0,5	0,5
		0,7	0,7
		0,9	0,9
Boue d'alun	mg-MES/L	0 ^a	
		57	0 ^a
		228	200
		400	

a : aucun ajout de boue (essais témoins).

Tableau 3. Résultats de phosphore filtrable à l'échelle pilote (mg-P/L)^a.

Concentration de coagulant	Essais témoins : 0 mg-MES/L			Recirculation de boues : 200 mg-MES/L		
	Prise 1	Prise 2	Prise 3	Prise 1	Prise 2	Prise 3
1,2 mg-Al ³⁺ /L	0,79	0,69	0,69	0,56	0,50	0,43
2,4 mg-Al ³⁺ /L	0,25	0,26	0,23	0,20	0,24	0,18

^a : phosphore filtrable (eau usée brute) = 1,26 mg-P/L.

Fig. 1. Effet du lieu d'introduction de la boue au procédé.

Boues = 140 mg-MES/L; coagulant (alun) = 2,4 mg- Al^{3+} /L.

Adjuvant de floculation (*Percol 902*) = 0,3 mg/L.

Essais en laboratoire (béchers).

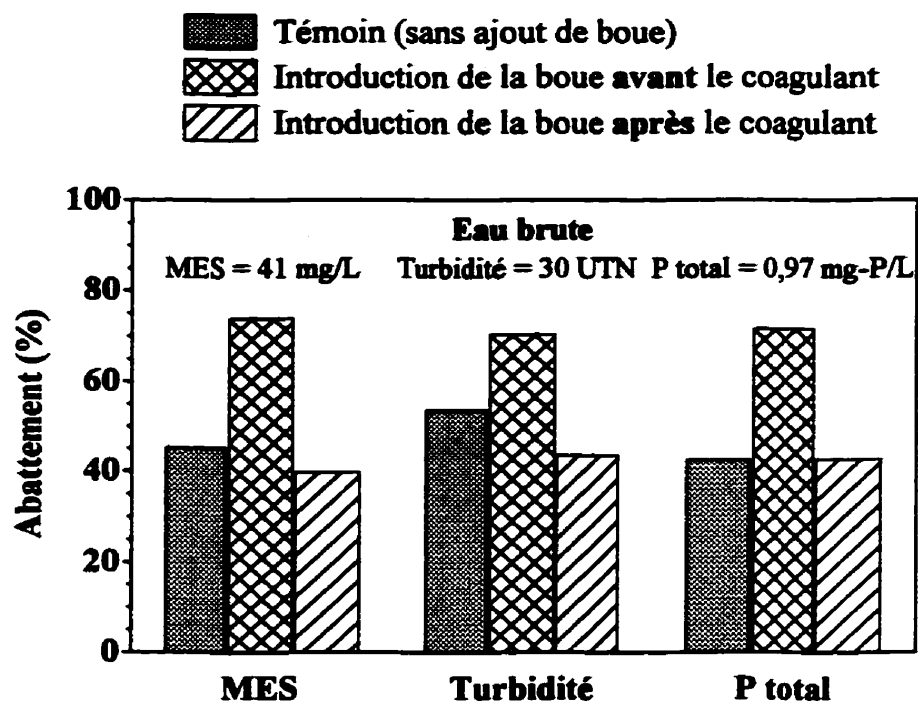


Fig. 2. Effet de la concentration de boues recirculées sur l'abattement des MES et du phosphore total : (a) MES; AF = 0,5 mg/L; (b) phosphore total; AF = 0,5 mg/L; (c) MES; AF = 0,3 mg/L; (d) phosphore total; AF = 0,3 mg/L. N.B. : AF = adjuvant de floculation (*Percol 902*).

—□— 0,3 mg- Al^{3+} /L —○— 0,6 mg- Al^{3+} /L —△— 1,2 mg- Al^{3+} /L —◇— 2,4 mg- Al^{3+} /L
Essais en laboratoire (bêchers); pH et alcalinité de l'eau brute = 7,3 et 200 mg- CaCO_3 /L.

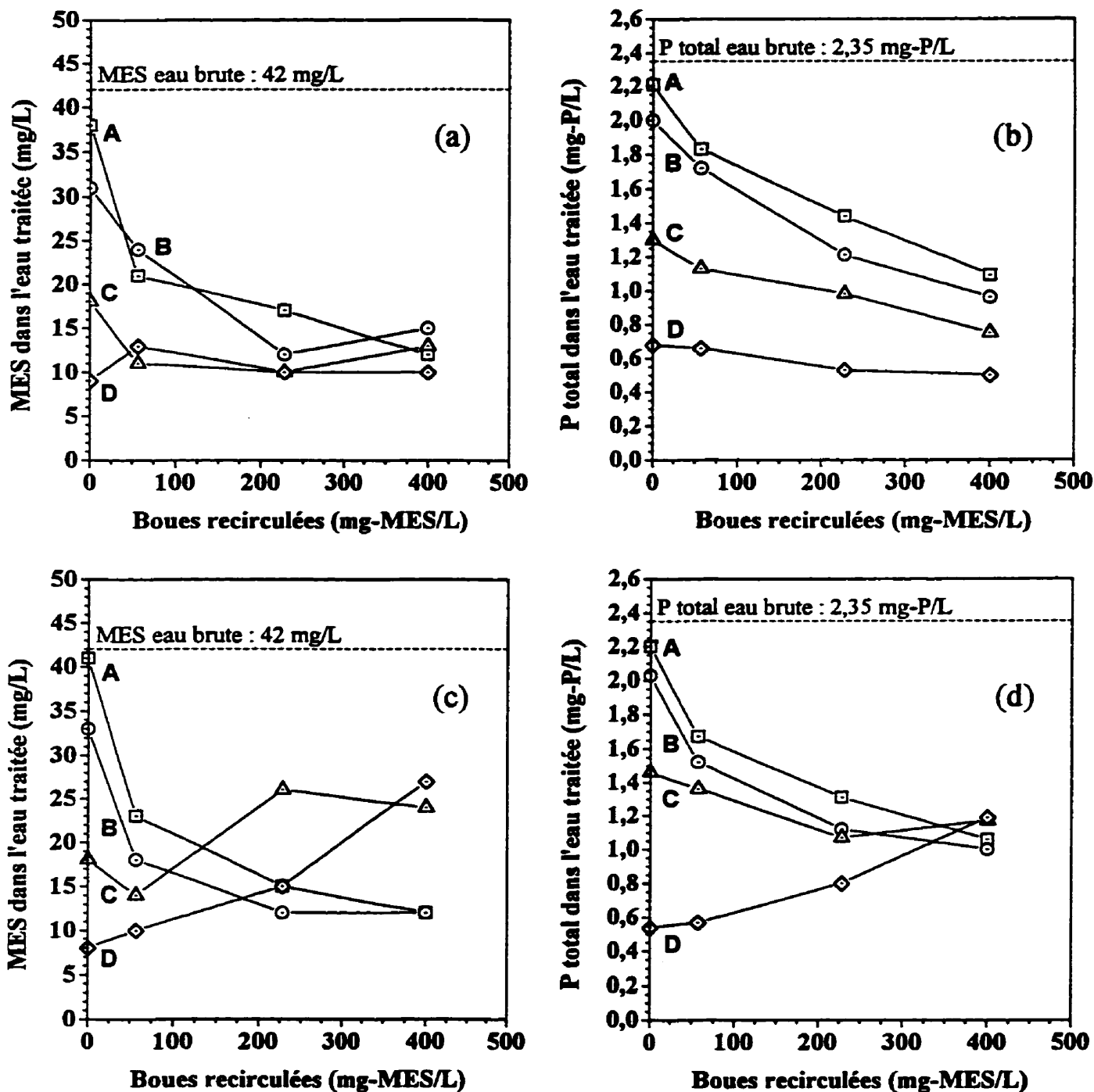


Fig. 3. Effet (a) de la concentration de boues recirculées et (b) de la concentration de coagulant ajoutée (alun) sur l'abattement du phosphore filtrable.

Essais en laboratoire (béchers); pH et alcalinité de l'eau brute = 7,3 et 200 mg- CaCO_3/L .

Adjuvant de floculation constant à 0,5 mg/L (*Percol 902*).

—□— 0,3 mg- Al^{3+}/L

—○— 0,6 mg- Al^{3+}/L

—△— 1,2 mg- Al^{3+}/L

—◇— 2,4 mg- Al^{3+}/L

—◇— Boues : 0 mg-MES/L

—△— Boues : 57 mg-MES/L

—○— Boues : 228 mg-MES/L

—□— Boues : 400 mg-MES/L

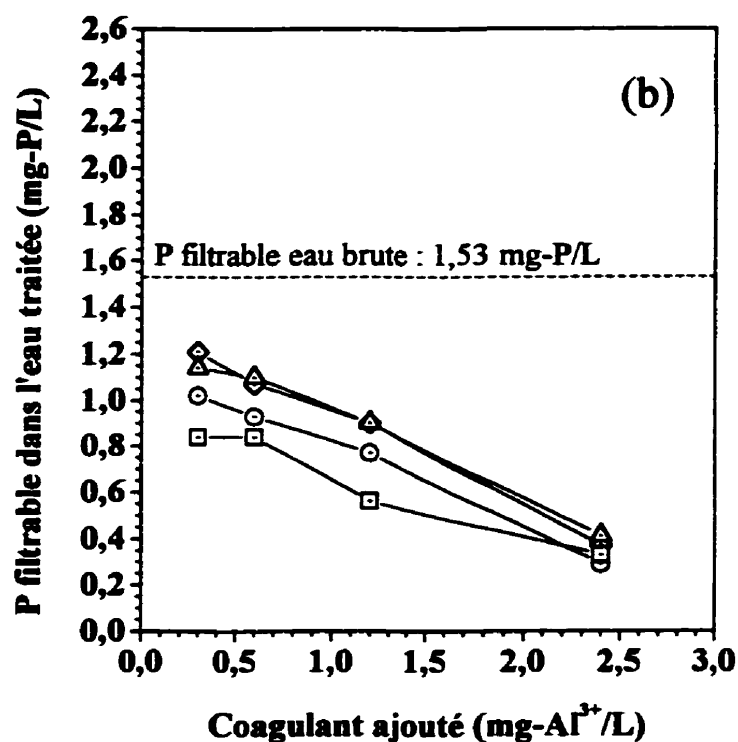
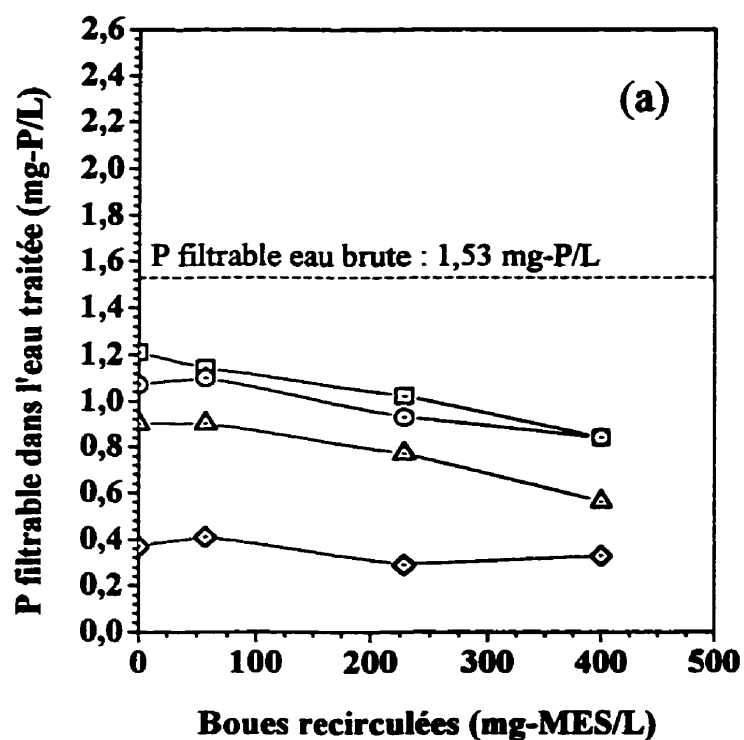


Fig. 4. Effet de la concentration de coagulant ajoutée (alum) sur l'abattement des MES et du phosphore total : (a) MES; AF = 0,5 mg/L; (b) phosphore total; AF = 0,5 mg/L; (c) MES; AF = 0,3 mg/L; (d) phosphore total; AF = 0,3 mg/L. N.B. : AF = adjuvant de floculation (*Percol 902*).

—◇— Boues : 0 mg-MES/L —△— Boues : 57 mg-MES/L
—○— Boues : 228 mg-MES/L —□— Boues : 400 mg-MES/L

Essais en laboratoire (béchers); pH et alcalinité de l'eau brute = 7,3 et 200 mg- CaCO_3/L .

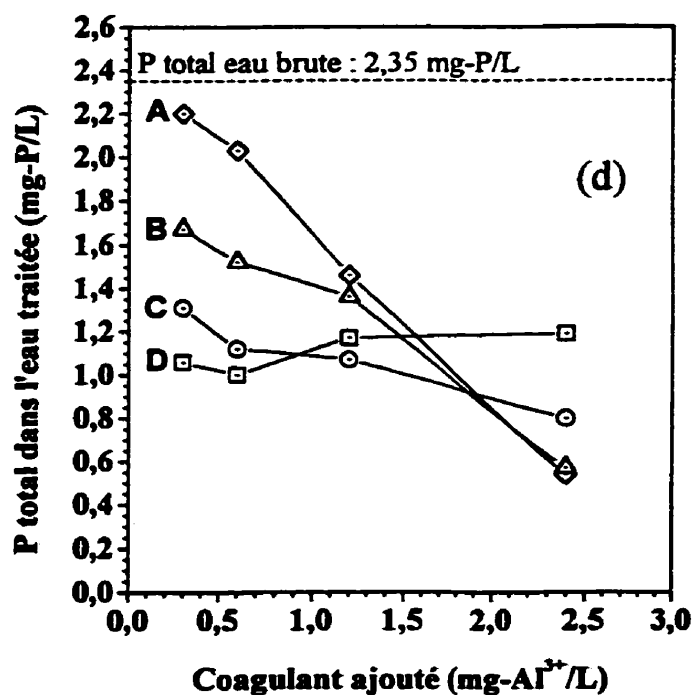
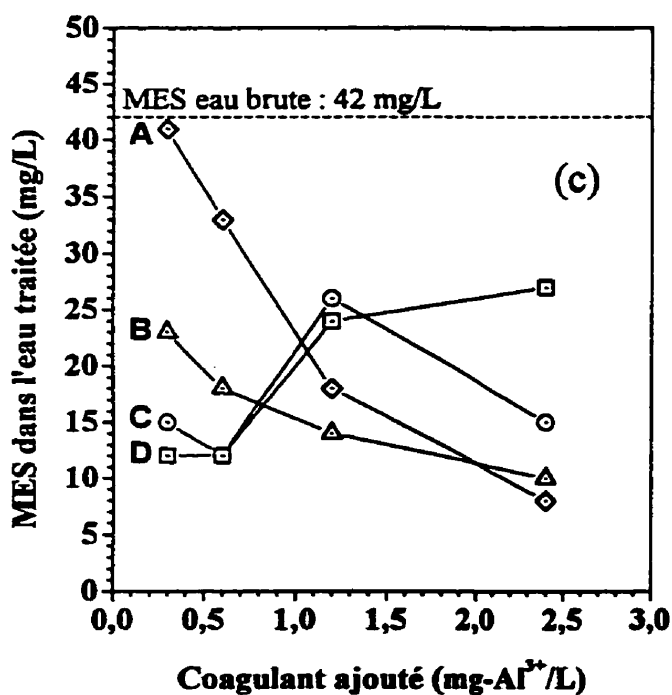
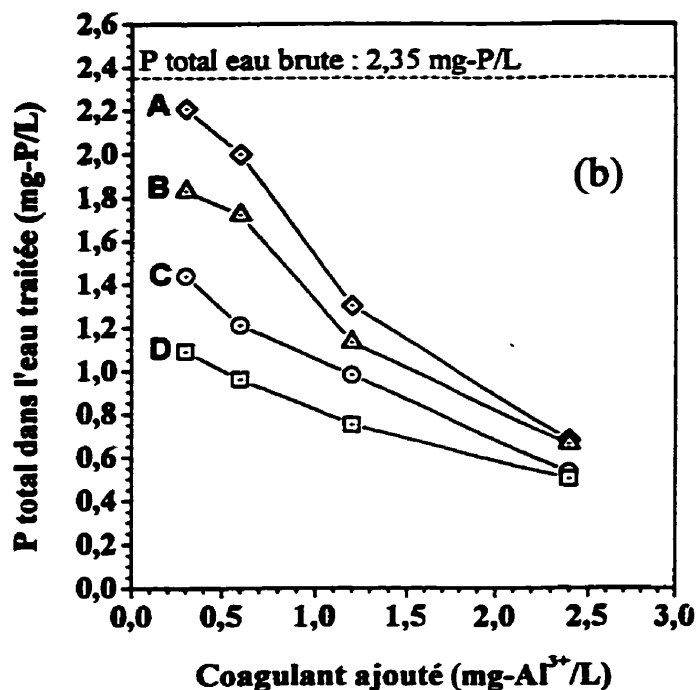
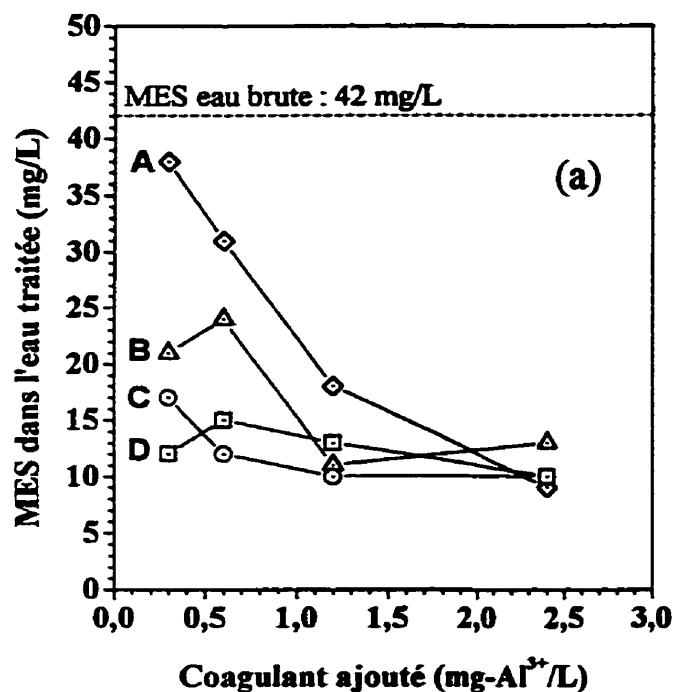


Fig. 5. Effet de la concentration d'adjuvant de floculation ajoutée (*Percol 902*) sur l'abattement (a) des MES et (b) du phosphore total.

Essais en laboratoire (béchers); pH et alcalinité de l'eau brute = 7,3 et 200 mg- CaCO_3/L .

Boues recirculées : concentration constante à 400 mg-MES/L.

—□— 0,3 mg- Al^{3+}/L —○— 0,6 mg- Al^{3+}/L —△— 1,2 mg- Al^{3+}/L —◇— 2,4 mg- Al^{3+}/L

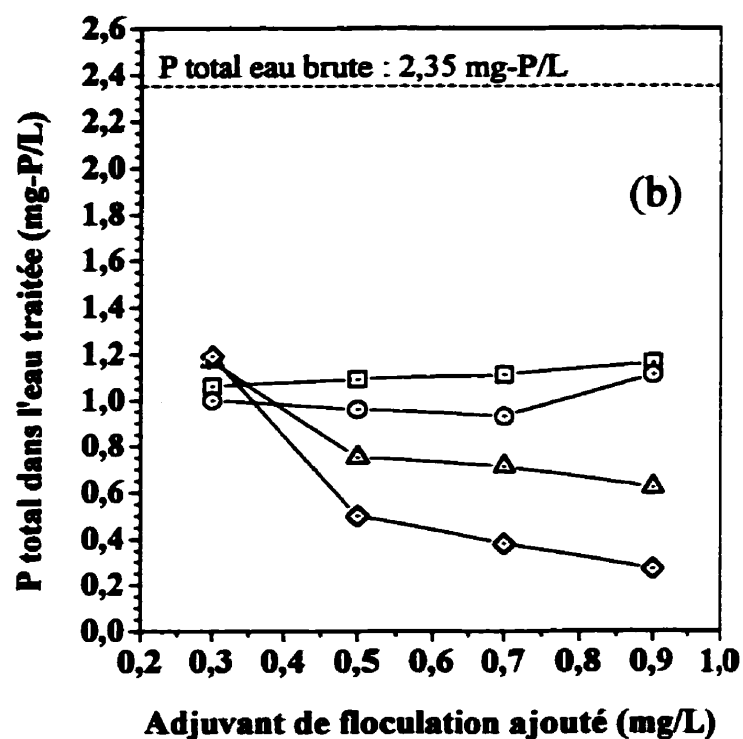
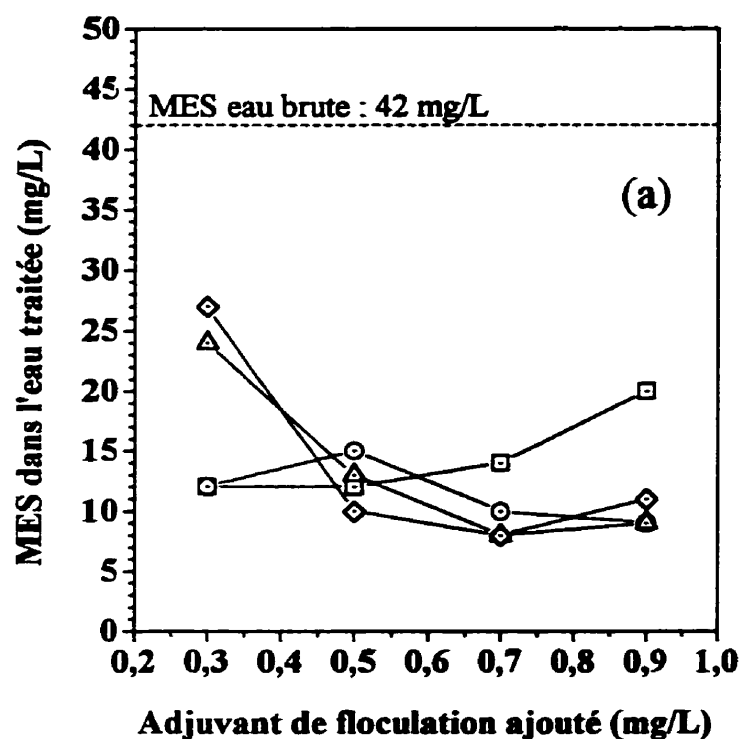


Fig. 6. Effet de la concentration d'adjuvant de floculation ajoutée (*Percol 902*) sur l'abattement des MES : (a) prise 1; coagulant = 1,2 mg- Al^{3+} /L; (b) prise 1; coagulant = 2,4 mg- Al^{3+} /L; (c) prise 3; coagulant = 1,2 mg- Al^{3+} /L; (d) prise 3; coagulant = 2,4 mg- Al^{3+} /L.

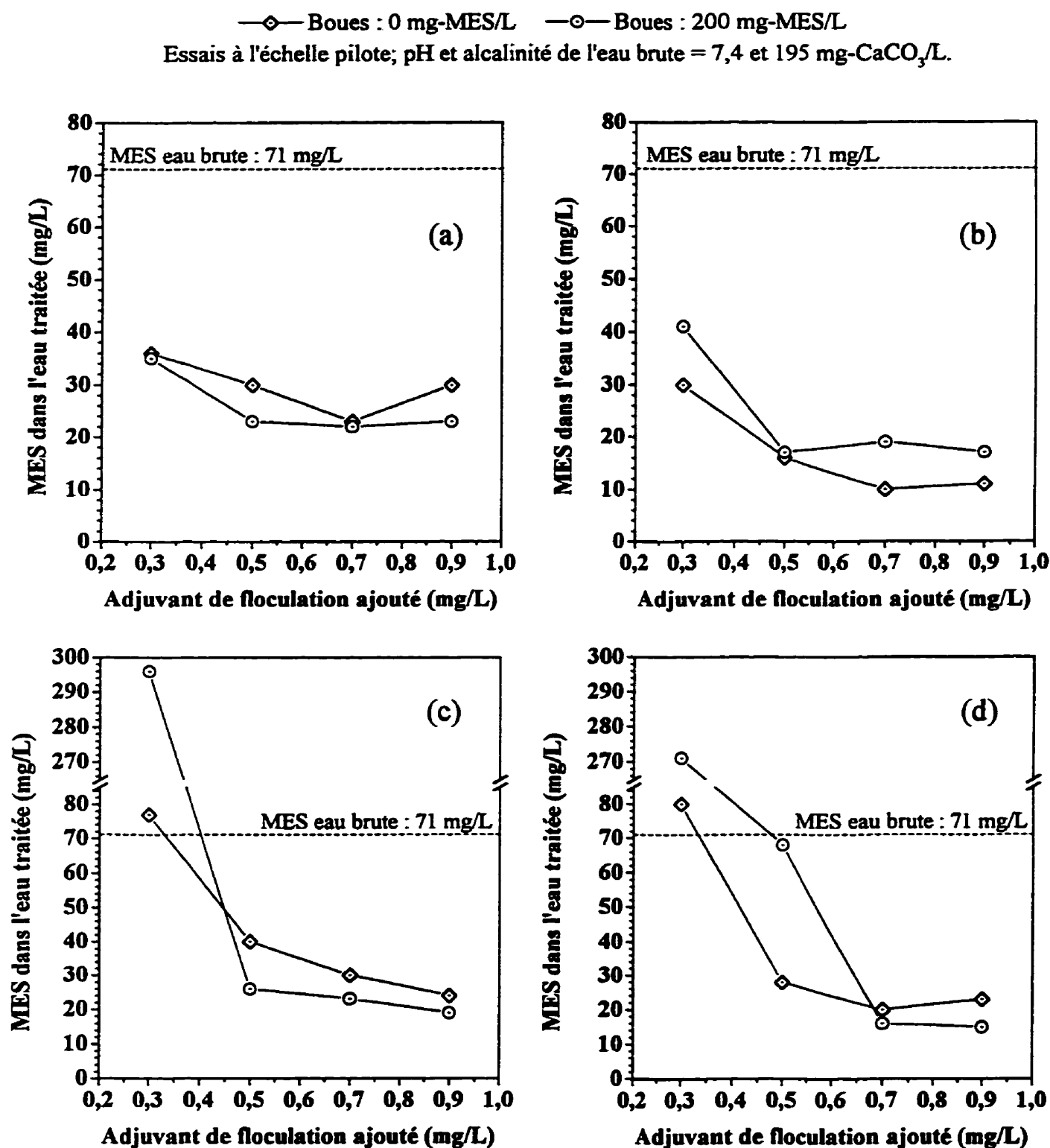


Fig. 7. Effet de la concentration d'adjuvant de floculation ajoutée (*Percol 902*) sur l'abattement du phosphore total : (a) prise 1; coagulant = $1,2 \text{ mg-Al}^{3+}/\text{L}$; (b) prise 1; coagulant = $2,4 \text{ mg-Al}^{3+}/\text{L}$; (c) prise 3; coagulant = $1,2 \text{ mg-Al}^{3+}/\text{L}$; (d) prise 3; coagulant = $2,4 \text{ mg-Al}^{3+}/\text{L}$.

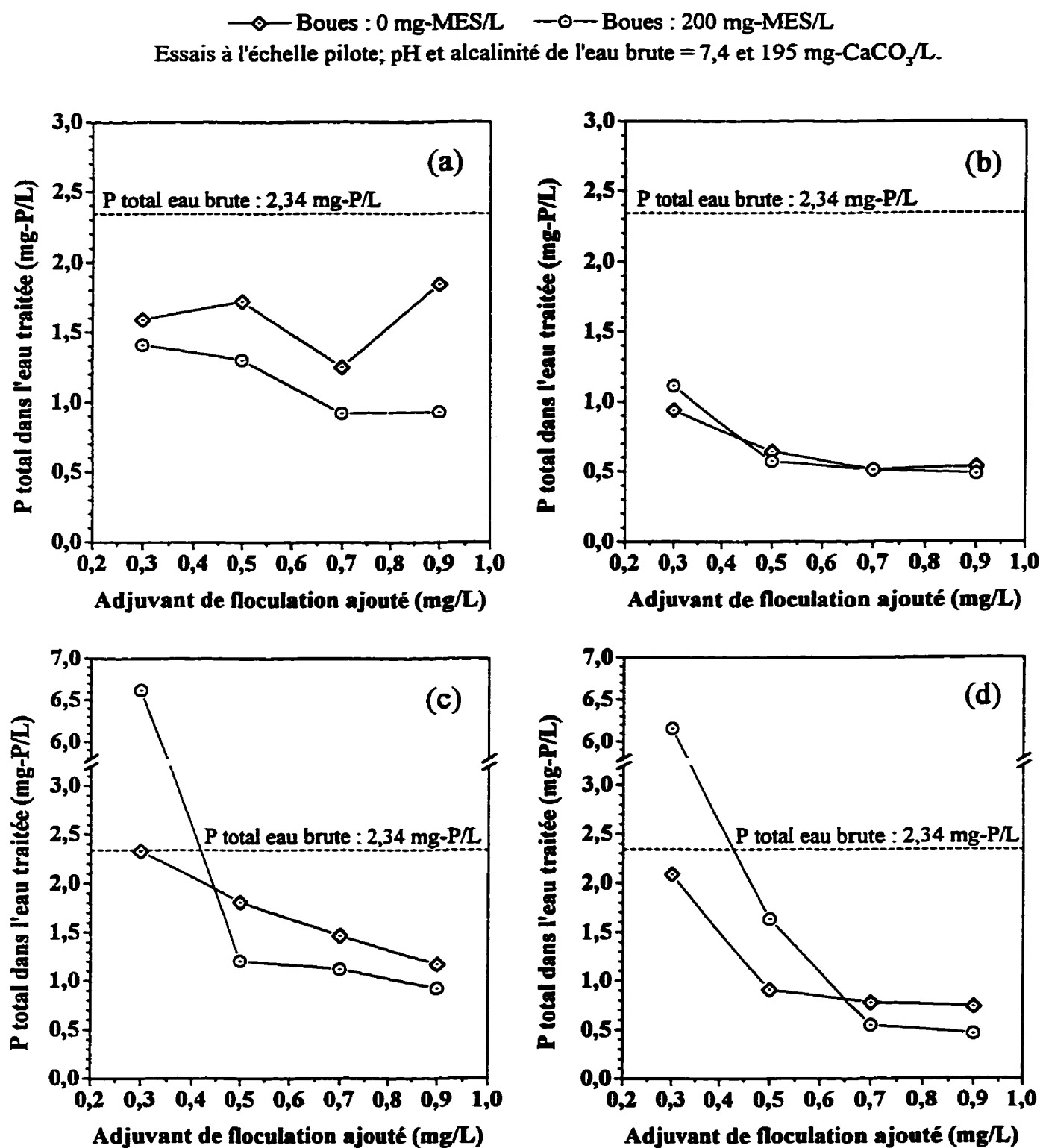
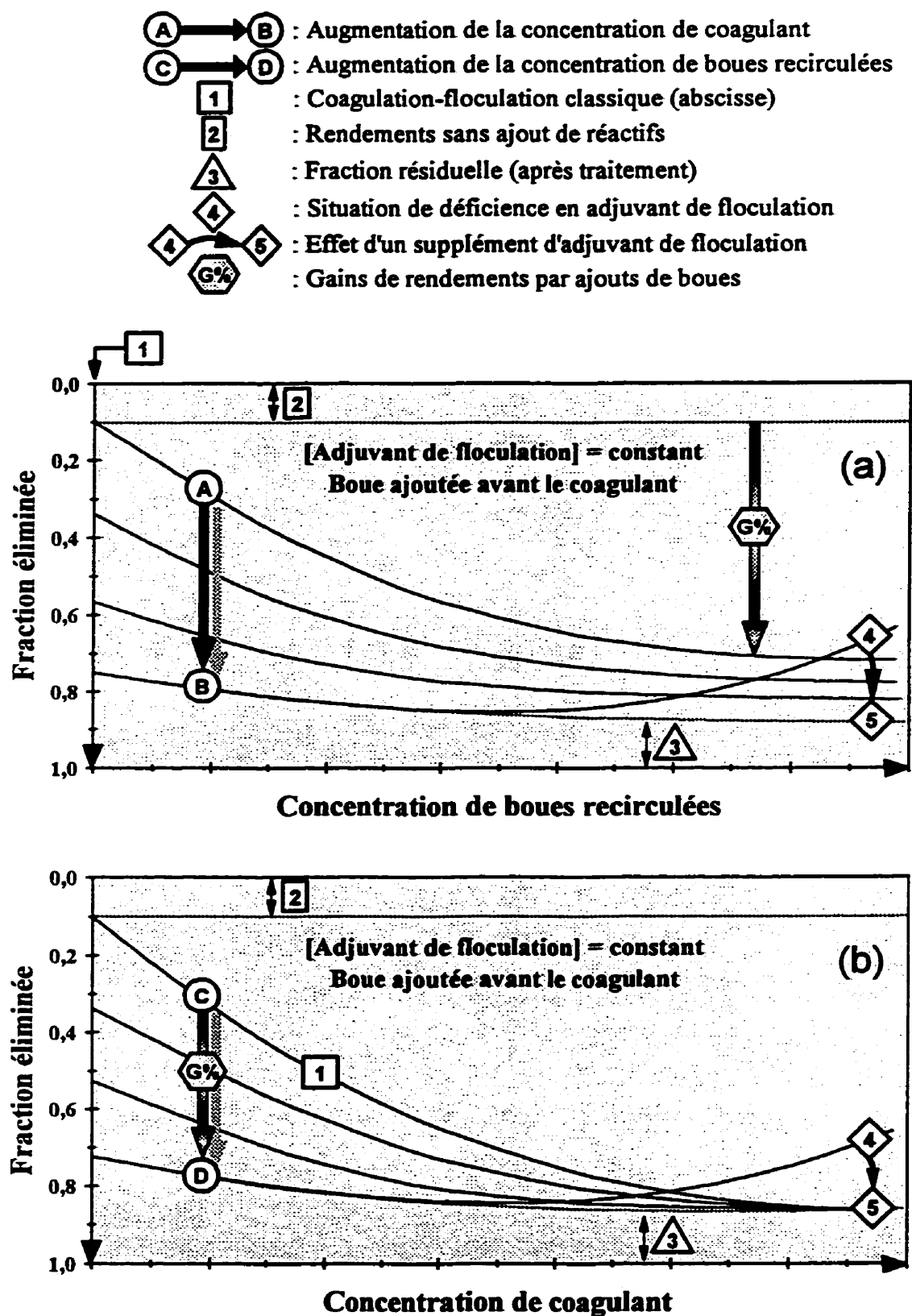


Fig. 8. Influence sur l'efficacité du procédé de la concentration (a) de boues recirculées et (b) de coagulant.



ANNEXE III

Article 3

Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : évaluation et validation à grande échelle

Auteurs : Frédéric MONETTE^a

François G. BRIÈRE^a

Michel LÉTOURNEAU^b

Marc DUCHESNE^c

Robert HAUSLER^c

Adresse des auteurs :

^a Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal,
Case postale 6079, succursale Centre-Ville, Montréal (Québec), H3C 3A7, Canada.

^b Groupe-conseil Génivar inc., 5355, boulevard des Gradins, Québec (Québec), G2J 1C8,
Canada.

^c Station expérimentale des procédés pilotes en environnement (STEPPE), Université
du Québec à Montréal, Case postale 8888, succursale Centre-Ville, Montréal (Québec),
H3C 3P8, Canada.

Article 3 soumis le 27 avril 1999 à la *Revue canadienne de génie civil*.

Résumé : Deux séquences d'essais ont été conduites au *Centre d'épuration Rive-Sud* (Longueuil, Canada) dans le but d'évaluer les performances du procédé de coagulation-floculation avec recirculation des boues produites. Lors des essais, l'évolution de la qualité des eaux traitées dans deux filières parallèles alimentées simultanément par une même eau brute, dont l'une intègre la recirculation, a été suivie. Les résultats montrent que la recirculation contribue à une dégradation significative de la qualité de l'eau par rapport à un procédé classique. Ces résultats ne corroborent pas ceux obtenus lors de travaux précédents (Monette *et al.* 1999a et 1999b). Ces mauvais résultats s'expliquent par des infrastructures inadéquates pour intégrer la recirculation. La forte concentration de coagulant employée limite également les gains de rendements associés à la recirculation. Le procédé réagit rapidement aux variations de charge de l'eau brute et de concentrations de réactifs. La présence de fines particules, générées par les turbulences induites par la pompe de recirculation, rend le conditionnement des boues légèrement plus difficile. Finalement, la mesure de la turbidité des eaux du flocculateur constituerait un excellent outil indicateur du taux de recirculation.

Mots clefs : Recirculation, boues, coagulation-floculation, traitement, eau usée, grande échelle.

Abstract: Two sequences of tests were carried out at the *Centre d'épuration Rive-Sud* wastewater treatment plant (Longueuil, Canada) to evaluate the performances of a coagulation-flocculation process with chemical sludge recycling. The tests consisted in following the evolution of the quality of the treated water when two flowsheets are supplied simultaneously in parallel with the same wastewater, one flowsheet incorporating the sludge recycling process. Results showed that the recycled sludge contributes significantly to water degradation compared to a classical coagulation-flocculation system. These results do not corroborate the previous work done by Monette *et al.* (1999a and 1999b). The problems observed are explained by inadequate plant installations for sludge recycling. High coagulant concentrations also limit the gains in efficiency associated with recycling. The process reacts rapidly to wastewater loading and reagents modifications. The recycled sludge conditioning is slightly more difficult due to the small particules created by recycling pump turbulence. Finally, turbidity measurements in the flocculator water tank could be used as an excellent indicator for sludge recycling load estimation.

Key-Words: Recycling, sludge, coagulation-flocculation, treatment, wastewater, full scale.

1. INTRODUCTION

Cette étude fait suite à des travaux de recherche antérieurs portant sur le traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation de boues chimiques urbaines. Ces travaux portaient sur l'analyse de la performance générale et de la stabilité du procédé (Monette *et al.* 1999a) et ont été suivi de l'étude de l'influence des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation, boue) sur le processus de traitement (Monette *et al.* 1999b). La présente étude vise l'amélioration des connaissances relatives à la mise en oeuvre de la recirculation dans une station d'épuration existante (régime dynamique) et la validation des conclusions tirées lors des travaux précédents.

Par le passé, plusieurs expériences de recirculation (ou réutilisation) de boues ont été conduites à grande échelle dans le but d'améliorer les rendements de la coagulation-floculation ou de diminuer les frais reliés à l'achat de réactifs chimiques. Certains auteurs ont abordé l'étude de la recirculation dans une station de traitement existante. Des fournisseurs ont développé et parfois mis en marché des équipements intégrant simultanément les fonctions de coagulation, floculation, décantation et recirculation. La plupart des expériences décrites dans la documentation scientifique réfèrent soit à la recirculation de boues d'eau potable, soit à l'utilisation d'équipements intégrés pour la production d'eau potable. Peu de travaux ont porté exclusivement sur la recirculation de boues chimiques lors de l'épuration des eaux usées d'origine urbaines.

1.1. REVUE DE LA DOCUMENTATION SCIENTIFIQUE

Plusieurs expériences menées au cours des 30 dernières années ont démontré le potentiel de réutilisation des boues produites par coagulation-floculation. Des essais à grande échelle effectués par Wilson *et al.* (1975) à Tampa (Floride, États-Unis) ont révélé que les boues d'alun (eau potable), rejetées à l'égout de façon contrôlée, pouvaient se substituer efficacement à l'alun commercial pour l'épuration des eaux usées. Les auteurs ne fournissent toutefois aucune information sur la concentration de boue utilisée et son taux de dilution dans le réseau d'égout.

De même, une étude effectuée en laboratoire (bêchers) par Lavoie et Meloche (1993) a permis d'identifier l'impact d'une recirculation de boues d'alun (eau potable) dans une station d'épuration par étangs aérés à Acton Vale (Québec, Canada). Les auteurs ont conclu que la boue acheminée directement à l'entrée du troisième étang de la station, par une conduite indépendante du réseau d'égout, permettrait de respecter les exigences québécoise de rejet de phosphore à l'effluent.

Pallo *et al.* (1972) ont mené au New Jersey (États-Unis) différentes expériences de recirculation des eaux de lavage des filtres au mélangeur rapide d'une station de traitement d'eau potable. Une amélioration de l'enlèvement de la turbidité et de la couleur a alors été observée. De plus, les floccs ainsi formés étaient plus denses et plus compacts et décantaient plus rapidement. Cette pratique a d'ailleurs permis de démontrer que le coagulant commercial employé seul s'avérait moins efficace que son utilisation conjointe avec les boues recirculées.

Ficquette (1981) a quant à lui étudié l'efficacité du traitement d'une eau de surface par recirculation de boues. Les résultats ont permis de conclure que la boue d'alun contribue à l'adsorption de la

couleur et de la turbidité et permet une réduction de la quantité d'alun commercial requise. Un enlèvement complet de la couleur a été réalisé avec 10 mg- Al^{3+} /L (alun) et 10% (vol./vol.) de boues recirculées. Malgré les bons résultats obtenus, l'auteur propose que l'étude se poursuive pour optimiser les quantités d'alun et de boues à ajouter. De plus, il suggère la réalisation d'essais dans un réacteur dynamique de coagulation-floculation et l'évaluation de l'effet de l'âge de la boue recirculée.

D'autres essais, menés dans une station d'épuration biologique en Suisse (Thomas 1972), ont montré que l'utilisation de boues ferriques pour le traitement tertiaire améliorerait considérablement l'enlèvement des phosphates, tout en permettant de diminuer la quantité de coagulant commercial. La recirculation permettrait également de stabiliser le niveau de phosphates à l'effluent. Aucune donnée n'est toutefois fournie quant à la concentration de boues recirculées.

Par ailleurs, Eckenfelder (1982) précise que les opérations de coagulation-floculation-clarification peuvent être effectuées dans un équipement unique (floculateur/décanteur) dans lequel un lit de boues est maintenu en suspension. Le recyclage de floccs préformés pourrait, dans certains cas, conduire à une économie de réactifs, à une meilleure qualité de l'effluent, à l'obtention d'une boue plus dense tout en diminuant le temps de formation des floccs. Plusieurs noms ont été donnés à ce procédé qui comporte soit une coagulation-floculation réalisée directement dans une zone de boue, soit une recirculation des boues dans la zone de coagulation-floculation : *clarificateur avec contact de la phase solide*, *clarificateur avec voile de boue*, *unité de clarification avec recirculation de solides*, etc. (ASCE & AWWA 1990; Bishop et Cichon 1984; Gupta et Ham 1983). Ces équipements ont

généralement été développés pour des applications en eaux potables ou industrielles. Grâce aux floccs préformés, les réactions chimiques seraient plus rapides et plus complètes. De plus, la recirculation de la boue initierait la croissance des floccs (ASCE & AWWA 1990). Gupta et Ham (1983) précisent que de meilleures performances ont été observées lorsque la boue recirculée a été ajoutée avant les réactifs.

De son côté, Dauthuille (1988) précise que, grâce à la recirculation des boues, le floc formé est compact et homogène de sorte que la charge superficielle peut être plus élevée que dans les équipements traditionnels. De plus, un tel système serait apte à absorber des variations de charges contrairement aux observations de Monette *et al.* (1999a). Cependant, aucune comparaison de performance avec les procédés classiques de coagulation-floculation n'est fournie.

Plus récemment, d'autres équipements utilisant la recirculation de boues ont fait leur apparition sur le marché. Ils permettent de combler le manque de noyaux de coagulation dans l'eau à traiter et d'alourdir les floccs formés. En effet, le procédé de type clarificateur à floculation lestée utilise du micro-sable comme noyaux de coagulation pour produire un floc plus dense qui décante plus rapidement. Le sable est ensuite séparé de la boue et recirculé (Cailleaux *et al.* 1992). Le manque de noyaux de coagulation ne constitue pas un véritable problème en épuration des eaux usées.

1.2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif de cette étude consiste à améliorer les connaissances reliées à la mise en oeuvre de la

recirculation de boues chimiques urbaines dans une station d'épuration existante. Elle vise d'une part, à comparer le comportement du procédé de coagulation-floculation avec recirculation de boues en régime dynamique avec celui d'un système classique et, d'autre part, à acquérir des connaissances relatives au contrôle du procédé en situation réelle de fonctionnement. Lors des essais, l'évolution de la qualité de l'eau traitée dans deux filières parallèles alimentées simultanément par une même eau brute, dont l'une intègre la recirculation, a été suivie. Les résultats obtenus permettront de valider les conclusions tirées lors des précédents travaux (Monette *et al.* 1999a et 1999b). De manière plus spécifique, les essais à grande échelle visent à :

- étudier l'influence sur le procédé de la concentration de coagulant et d'adjuvant de floculation ainsi que de celle du taux de recirculation;
- vérifier les effets de changements de caractéristiques d'eau brute (charge) sur la stabilité du procédé;
- déterminer des moyens de contrôle simples du procédé (outils indicateurs de fonctionnement);
- estimer les effets possibles de la recirculation des boues et de leur pompage sur les caractéristiques des boues produites et sur leur conditionnement;
- évaluer l'économie de réactifs chimiques (coagulant, adjuvant de floculation) engendrée par la recirculation de boues.

Les essais à grande échelle ont été conduits au *Centre d'épuration Rive-Sud* (CÉRS) localisé à Longueuil (Québec, Canada). Cette station de type physico-chimique peut retourner ses boues produites aux décanteurs, en amont des flocculateurs, soit après le coagulant, mais tout juste avant

l'adjuvant de floculation.

D'autres essais complémentaires de recirculation ont également été réalisés en laboratoire (bêchers) en vue d'expliquer certains résultats obtenus à grande échelle. Plus spécifiquement, ces essais ont porté sur l'étude de l'impact de la pompe de recirculation sur les caractéristiques physiques des boues ainsi que sur l'évaluation du meilleur lieu possible d'introduction de la boue à la station d'épuration du CÉRS.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. ESSAIS DE RECIRCULATION À GRANDE ÉCHELLE

2.1.1. Généralités Le coagulant et l'adjuvant de floculation employés lors des essais ont été respectivement l'alun $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$ et le *PAM 703* d'*Allied Colloids* (anionique). Sauf indication contraire, l'alun a été utilisé dans sa forme commerciale sans dilution préalable. Un conditionneur cationique, le *Prosédim CS-243* de *Degrémont Erpac*, a été employé lors des tests de conditionnement et de déshydratation de boues. L'eau usée reçue et traitée au CÉRS provenait de sept municipalités et se composait d'un mélange d'origines domestique, pluviale, institutionnelle et industrielle dont la température voisinait 7°C (conditions hivernales). Aucun événement exceptionnel n'est survenu durant les séquences d'essais (pluies violentes, fonte rapide des neiges, etc.).

2.1.2. Infrastructures Les travaux consistaient à comparer l'évolution de la qualité de l'eau traitée

par deux filières parallèles, alimentées par une même eau usée, dont l'une intégrait la recirculation. À cette fin, deux des quatre filières du CÉRS ont été affectées aux expériences, soit la filière A (avec recirculation) et la filière témoin B (sans recirculation). La figure 1a schématise les deux filières ainsi que les points d'injection possibles des réactifs (coagulant, adjuvant de floculation), injections qui ont été effectuées de manière indépendante pour chacune des filières. Toutes les eaux usées ont d'abord subi un dégrillage et un dessablage.

Comme en témoigne la figure 1b, les boues étaient recirculées depuis la fosse des décanteurs vers la chambre de mélange rapide de chacune des filières. Le contrôle de la recirculation de boues était assuré par la pompe à lobes de refoulement, l'ouverture de la vanne située sur la conduite de recirculation ainsi que par des lectures du débitmètre. Le contrôle reposait aussi sur l'équilibre du système puisque la pompe fonctionnait en régime dynamique, peu importe la concentration des boues extraites. Malheureusement, aucune mesure en continu de la concentration de boues recirculées n'a pu être effectuée lors des essais en raison d'une défectuosité des densimètres.

2.1.3. Échantillonnage Afin d'évaluer les performances du procédé, des échantillons composés ont été prélevés à l'affluent et à l'effluent de chacune des filières (figure 1a). Ces échantillons ont été constitués sur une période variant de 4 à 8 heures (durée selon les séquences particulières d'essais) par des prélèvements à toutes les 15 minutes d'un volume ponctuel de 250 mL. Le démarrage des échantillonneurs à l'affluent et à l'effluent a été décalé de près d'une heure afin de tenir compte du temps de résidence moyen des eaux usées. Des échantillons instantanés ont également été prélevés quotidiennement dans chacun des flocculateurs et à l'effluent (goulottes de reprise des eaux clarifiées)

tel qu'indiqué à la figure 1a. Les mesures de MES et de turbidité de ces échantillons ont permis d'évaluer le taux de recirculation instantané et la qualité de son contrôle ainsi que de comparer les rendements instantanés des deux filières. Finalement, des échantillons de boues ont été prélevés journallement par le biais de prises situées sur les conduites de refoulement des boues décantées (en direction des épaisseurs).

2.1.4. Protocole expérimental et essais de recirculation Deux séquences d'essais ont été réalisées : la première d'une durée de 113 heures (séquence I) et la seconde s'étalant sur une période de 64 heures (séquence II). La stratégie initiale consistait à exploiter les deux filières de traitement avec une même concentration de coagulant et un taux non-limitatif d'adjuvant de floculation, de façon à observer les gains associés à la recirculation de boues. Après coup, une diminution de la concentration de coagulant à la filière A (avec recirculation) est envisagée, tout en cherchant à obtenir des rendements équivalents aux deux filières. Lors de chacune des séquences, la filière témoin B a été exploitée selon les habitudes de la station, soit l'injection des produits chimiques en fonction de la charge de l'eau brute, de manière à respecter les exigences de rejet imposées par le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF). Quant à la filière A, elle a été exploitée, dans toute la mesure du possible, comme suit :

- ajout d'une concentration de coagulant équivalente à celle de la filière témoin B : condition respectée sauf indication contraire (différences moyennes entre les filières, inférieures à 1%);
- débit d'eau affluent similaire à celui de la filière témoin B : condition respectée (différences moyennes entre les filières, inférieures à 2%);

- ajustement de la concentration d'adjuvant de floculation selon les besoins : condition respectée;
- recirculation de boues contrôlée à un taux jugé suffisant compte tenu de la concentration de coagulant injectée : condition peu ou pas respectée en raison du faible niveau de souplesse des équipements assurant le contrôle du flux massique de boues recirculées.

Certaines conditions particulières devaient être respectées pour pouvoir comparer les résultats :

- alimentation des deux filières avec une eau brute de caractéristiques similaires : condition respectée et vérifiée (différences maximales de 2%; écarts-types comparables);
- exploitation similaire des équipements (mélangeurs rapides, mélangeurs lents, etc.) des deux filières et similitude de leurs infrastructures : condition respectée sauf indication contraire. À cet effet, la différence de longueur entre les canaux d'amenée des eaux coagulées des deux filières doit être signalée (figure 1a);
- rendements épuratoires comparables des deux filières en condition normale d'exploitation (sans recirculation) : condition respectée selon les informations disponibles au CÉRS.

Les débits bruts à la station ont atteint des valeurs moyennes de près de 335 000 m³/d et 250 000 m³/d lors de la première et la seconde séquence d'essais. Le débit moyen du CÉRS se situe aux environs de 300 000 m³/d, soit 75 000 m³ par filière. La recirculation de la boue à la chambre du mélangeur rapide a débuté près de huit heures avant le début des séquences d'essais afin d'atteindre des conditions d'équilibre et une concentration adéquate de boues recirculées.

2.2. ESSAIS COMPLÉMENTAIRES DE RECIRCULATION EN BÉCHERS

2.2.1. Généralités Les essais complémentaires de coagulation-floculation (béchers de 2 L) ont été conduits sur des bancs de coagulation-floculation *Phipps & Birds (Richmond)* avec une eau usée dégrillée et dessablée, prélevée ponctuellement au CÉRS. Le coagulant et l'adjuvant de floculation employés lors de ces essais ont été respectivement l'alun $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O]$ et le *Percol 902* d'*Allied Colloids* (anionique). L'alun a été dilué 10 fois avec de l'eau distillée avant son utilisation (pH de la solution contrôlé à l'acide sulfurique). Tous les essais complémentaires ont été effectués avec des eaux usées stabilisées à la température ambiante du laboratoire, soit près de 21°C.

2.2.2. Protocoles expérimentaux et essais de recirculation Les essais de recirculation en béchers ont été conduits suivant deux procédures expérimentales. La première (procédure n°1) correspond au protocole détaillé par Monette *et al.* (1999b) avec ajout de boues avant le coagulant. La seconde (procédure n°2) est identique à la première sauf que la boue est introduite après le coagulant et au même moment que l'adjuvant de floculation (simulation des conditions spécifiques du CÉRS).

Comme en témoigne le tableau 1, deux séries d'essais ont été réalisées lors de ces expériences complémentaires. D'abord, la Série I, conduite selon la procédure n°1, visait à déterminer l'impact physique de la pompe (à lobes) de recirculation sur la boue. Deux échantillons de boues ont ainsi été prélevés dans les heures précédant les essais : le premier après le pompage, par une prise d'échantillonnage installée sur la conduite de refoulement des boues vers les épaisseurs et le

second, suite à un écoulement gravitaire (sans pompage) par une prise d'échantillonnage située sur une conduite reliée à la fosse du décanteur. Par ailleurs, la *Série II*, menée selon les procédures n°1 et n°2, cherchait à évaluer l'effet du lieu d'introduction de la boue (prélevée par écoulement gravitaire) dans les conditions spécifiques prévalant au CÉRS. Les concentrations de réactifs étudiées lors des deux séries d'essais sont présentées au tableau 1. Des essais témoins, sans ajout de boues, ont également été réalisés dans des conditions similaires.

Finalement, préalablement aux séries d'essais I et II, chacune des deux boues utilisées a été soumise à des tests complémentaires de décantation en laboratoire. Ces tests ont consisté à noter la chute de l'interface du lit de boues en fonction du temps dans un cylindre d'un litre. Pour comparer les deux boues sur une même base, leur siccité a été ajustée à une valeur similaire par dilution.

2.3. MÉTHODES ANALYTIQUES

Toutes les analyses ont été conduites selon les méthodes normalisées indiquées au manuel *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al. 1995). Les analyses des MES et des paramètres filtrables ont été réalisées avec des membranes en fibre de verre 934-AH de Whatman d'une porosité de 1,5 μm . Toutes les mesures de turbidité ont été effectuées avec un appareil de marque HACH (modèle 2100P). Le potentiomètre de marque HANNA (modèle HI8314) a servi aux mesures *in-situ* du pH de l'eau et du potentiel d'oxydo-réduction (POR) de la boue.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. ESSAIS À GRANDE ÉCHELLE

3.1.1. Séquence d'essais I (113 heures) Les figures 2a et 2b présentent les résultats de phosphore total et de MES des échantillons composés prélevés à l'affluent et à l'effluent des filières A (avec recirculation) et B (sans recirculation). À titre de repère, des lignes horizontales, correspondant aux exigences de rejet de phosphore total (0,5 mg-P/L) et de MES (20 mg/L) au CÉRS, ont également été tracées. Les débits d'eau usée, de même que les concentrations de coagulant et d'adjuvant de floculation pour les échantillons composés des différents groupes d'heures, sont indiqués au tableau 2. Puisque les résultats de turbidité et de demande chimique en oxygène (DCO) ont montré des tendances similaires, leur présentation a été omise. Les figures 3a, 3b, 3c et 3d illustrent pour les mêmes heures, les résultats de turbidité instantanée à l'effluent des filières A et B, les valeurs de MES instantanées mesurées aux flocculateurs, ainsi que les concentrations de coagulant et d'adjuvant de floculation employées.

Échantillons composés

Les résultats de phosphore total et de MES obtenus (figures 2a et 2b) montrent que la recirculation de boues, telle que mise en oeuvre au CÉRS, contribue à une dégradation de la qualité de l'effluent. En effet, toutes les valeurs résiduelles de phosphore total et de MES des échantillons prélevés à la filière A (avec recirculation) se révèlent supérieures à celles obtenues à la filière témoin B.

Une analyse plus précise des résultats ne permet pas d'établir de lien entre les charges en phosphore total ou en MES de l'eau brute et les écarts de rendement entre les filières A et B. Ces écarts ne sont pas affectés par les variations de charges. Toutefois, la concentration de phosphore total à l'eau brute a peu varié durant la séquence d'essais, soit entre 1,44 à 2,00 mg-P/L. Les variations des valeurs de MES se sont montrées plus importantes allant de 50 à 147 mg/L. Ces résultats rejoignent ceux obtenus antérieurement par Monette *et al.* (1999a), qui démontraient que la recirculation ne contribue pas de manière évidente à absorber des variations de charges de l'eau brute. Par ailleurs, aucune relation claire n'a pu être établie entre les variations de débit et l'efficacité du procédé. Les groupes d'heures correspondant respectivement au débit maximal («57h à 65h» : 106 500 m³/d • filière) et minimal («97h à 105h» : 62 000 m³/d • filière) montrent une tendance identique, soit toujours à l'avantage du procédé de coagulation-floculation classique. De même, l'analyse des taux de recirculation (figure 3b) en relation avec les rendements observés pour les deux filières ne mène à aucune tendance précise. Le faible nombre de données ne permet pas d'extrapoler de conclusions claires à ce sujet.

Par ailleurs, les écarts de rendements entre les deux filières sont peu sensibles aux variations de concentrations de coagulant injectées (2,58 à 4,13 mg-Al³⁺/L). Ce résultat est assez surprenant compte tenu de l'influence marquée de la concentration de coagulant sur les performances du procédé (Monette *et al.* 1999b). L'analyse des échantillons instantanés permettra de raffiner cette interprétation.

Comme en témoigne le tableau 2, les besoins en adjuvant de floculation s'avèrent nettement plus

importants à la filière A. L'examen des concentrations ne révèle aucun effet précis sur le rendement du procédé. La concentration maximale d'adjuvant de floculation, correspondant au groupe d'heures «73 h à 81 h» (0,85 mg/L), ne conduit pas à une diminution nette des écarts de rendement entre les deux filières, sauf dans le cas des MES où des valeurs résiduelles équivalentes ont été obtenues.

Échantillons instantanés

De manière générale, les résultats instantanés corroborent ceux des échantillons composés. En effet, 30 des 35 mesures de turbidité à l'effluent avantagent la filière témoin B, malgré une concentration plus élevée d'adjuvant de floculation à la filière A. À l'exception de la journée couvrant les heures «32 à 41», les deux filières présentent un schéma évolutif quotidien assez semblable avec des rendements épuratoires plutôt voisins pour une faible charge d'eau usée (en avant-midi) puis nettement à l'avantage de la filière témoin B dès l'arrivée de la charge de l'après-midi. Puisque l'arrivée de cette charge (phosphore total, MES, turbidité, etc.) ne se jumelle pas à un accroissement de débit, les difficultés de traitement de la filière A pourraient être, dans une certaine mesure, associés à la charge de l'eau.

L'analyse des valeurs de turbidité instantanée aux deux filières, en fonction des concentrations de coagulant (figure 3a et 3c), révèle que la performance de la filière A est nettement plus affectée lorsque de fortes concentrations sont utilisées. L'examen des résultats de la seconde journée d'essais, couvrant les heures «32 à 41», démontre que les difficultés de traitement de la filière A coïncident avec des concentrations élevées de coagulant, même durant la période de faible charge du matin. Les MES

mesurées au flocculateur de la filière A, représentatives du taux de recirculation, atteignent toutefois de fortes valeurs lors de cette journée (figure 3b). À l'opposé, des performances assez voisines se remarquent à de plus faibles concentrations de coagulant. Les difficultés de la filière A ne sont donc pas uniquement associées à la charge de l'eau brute, mais également aux concentrations de coagulant utilisées. Ces résultats rejoignent, dans une certaine mesure, ceux des travaux précédents (Monette *et al.* 1999b) en vertu desquels les auteurs concluent à la compétitivité entre l'action de la boue et celle du coagulant. À forte concentration de coagulant, la boue ne peut participer pleinement au traitement conduisant ainsi à des écarts de rendements plus importants entre les filières. Cette situation n'explique toutefois pas la dégradation généralisée de la qualité de l'eau.

L'analyse de l'évolution des valeurs de MES aux flocculateurs révèle certaines difficultés associées au contrôle du flux de solides recirculés. En effet, alors que les MES au flocculateur de la filière témoin B (sans recirculation) augmentent graduellement au cours d'une même journée d'essais (figure 3b), certaines fluctuations s'observent à la filière A. Ces fluctuations découlent directement des équipements au CÉRS (vanne, pompe, débitmètre, etc.), qui n'offrent pas le niveau de souplesse nécessaire au plein contrôle du procédé. En pratique, le contrôle était essentiellement manuel et ne dépendait que des mesures de MES aux flocculateurs des deux filières. Des analyses de turbidité aux flocculateurs ont d'ailleurs été envisagées pour estimer rapidement les MES présentes au flocculateur.

Par ailleurs, les valeurs journalières moyennes de MES mesurées au flocculateur A varient beaucoup plus que celles du flocculateur B. Les plus grands écarts de turbidités instantanées entre les deux

filères se remarquent lors de la deuxième journée d'essais («32h à 41h»). Lors de cette journée, les valeurs de MES instantanées de la filière A varient entre 343 mg/L et 454 mg/L et celle de la filière B entre 61 et 118 mg/L. Les valeurs élevées de MES mesurées à la filière A, représentatives du taux de recirculation, ainsi que les variations observées sont significatives d'une certaine perte de contrôle du procédé de recirculation. Afin de rétablir la situation, la recirculation a été interrompue à deux reprises lors de la seconde journée (heures «40,5» et «47»). De plus, les vitesses des mélangeurs lents du flocculateur de la filière A ont dû être augmentées progressivement à l'heure «39,5» en raison de problèmes de dépôts de boues. Les concentrations élevées de MES relevées à l'heure «40,5» s'expliqueraient d'ailleurs par l'affouillement des boues accumulées au flocculateur de cette filière. Le système n'a donc pas atteint l'équilibre particulier. Idéalement, une concentration moyenne de MES semblable d'une journée à l'autre doit être recherchée, peu importe les variations de caractéristiques d'eau brute. Ce niveau de contrôle, difficile à atteindre en pratique, requiert un suivi rigoureux du procédé et des équipements adaptés.

L'examen des concentrations d'adjuvant de floculation en relation avec la turbidité résiduelle à l'effluent ne permet pas de tirer de conclusions fermes quant à son effet sur l'efficacité de la coagulation-floculation des deux filières (figures 3a et 3d). Seules des difficultés de fonctionnement de la pompe-doseuse à la filière A doit être souligné entre les heures «67» et «69». D'ailleurs, ce problème conduit à une dégradation subite de l'effluent. L'impact d'une déficience en adjuvant de floculation s'avère donc particulièrement critique à l'égard de la performance du procédé. Ce résultat rejoint ceux obtenus lors de travaux précédents (Monette *et al.* 1999a et 1999b) relativement à la nécessité d'augmenter les concentrations d'adjuvant en fonction de la quantité de MES recirculées.

Par ailleurs, l'analyse des valeurs de turbidités instantanées lors de la seconde journée («32h à 41h»), en relation avec l'augmentation de la concentration d'adjuvant de floculation, ne montre aucune réduction des écarts de rendements entre les filières. D'autres augmentations rapides de la concentration d'adjuvant sont également survenues aux périodes «64h à 65h» et «108h à 110h». Au mieux, elles ont contribué à des améliorations momentanées de la situation. Ces observations, jumelées aux problèmes de fonctionnement de la pompe-doseuse, qui a démontré l'effet d'une réelle carence en adjuvant de floculation, laisse croire que la concentration d'adjuvant de floculation a suffi aux besoins d'agrégation des floes.

Finalement, à la fin de la séquence d'essais, le système s'est rétabli rapidement suite à l'arrêt de la recirculation. Un délai de 30 à 45 minutes a suffi pour que les valeurs de MES au flocculateur de la filière A rejoignent celles de B. Ce rétablissement, observé entre les heures «112» et «113», correspond en pratique à une valeur comparable à celle du temps de résidence hydraulique de l'équipement. Par ailleurs, aucun problème particulier de production de gaz n'a été remarqué lors des essais, peu importe les taux de recirculation. Des taux élevés auraient pu notamment entraîner un vieillissement de la boue, une production de gaz de digestion, en plus de concourir à des problèmes de remontées de boues (micro-flottation). Cet aspect mérite une surveillance accrue en périodes estivales.

3.1.2. Séquence d'essais II (64 heures) Les figures 4a et 4b présentent les résultats de phosphore total et de MES des échantillons composés prélevés à l'affluent et l'effluent des filières A (avec recirculation) et B (sans recirculation). Les débits d'eau usée, de même que les concentrations moyennes de coagulant et d'adjuvant de floculation, sont indiqués au tableau 3. Les

figures 5a, 5b, 5c et 5d illustrent également les résultats de turbidité instantanée à l'effluent, les valeurs de MES instantanées mesurées aux flocculateurs ainsi que les concentrations de coagulant et d'adjuvant de floculation employées.

Échantillons composés

L'interprétation des résultats pour le phosphore total et les MES des échantillons composés de cette séquence rejoint globalement celle de la séquence d'essais I. Sans égard aux conditions spécifiques d'essais, un seul échantillon sur les 12 analysés (groupe d'heures «36h à 40h») révèle une concentration significativement inférieure en phosphore total, et ce, en raison d'une augmentation volontaire et contrôlée de la concentration de coagulant à la filière A. Dans les cas des MES, six échantillons sur 12 montrent une valeur égale ou inférieure lorsqu'une boue est recirculée.

L'examen des variations de charge de l'eau brute (phosphore total, MES) en fonction des écarts de rendements entre les filières A et B ne permet pas d'établir de tendance évidente. Les écarts semblent assez aléatoires et indépendants des variations observées. Les valeurs de phosphore total et de MES évoluent respectivement entre 1,86 et 3,18 mg-P/L et entre 56 et 162 mg/L. Comparativement à la séquence d'essais I, les débits ne varient pas de manière aussi importante (50 000 à 71 000 m³/d • filière). Les tendances sont assez variables, avantageant généralement la filière B (sans recirculation) lors des périodes de pointe minimale et maximale de débit. De même, les variations de taux de recirculation n'affectent pas les écarts de rendements entre les deux filières.

De manière générale, les variations de concentrations de coagulant (entre 3,15 mg- Al^{3+} /L et 6,35 mg- Al^{3+} /L) ne créent pas d'impact sur les performances relatives des deux filières de traitement. Deux périodes d'essais de quatre heures, parmi les 12 complétées, permettent d'ailleurs d'évaluer l'effet d'une modification de la concentration de coagulant sur les rendements des procédés. Comme en témoigne les résultats, la réduction de la concentration de coagulant à la filière A par rapport à B («32h à 36h»), mène à une dégradation significative de la qualité de l'eau. L'effet se remarque plus particulièrement pour le phosphore total. Sa composante filtrable, dont l'élimination dépend fortement de la concentration de coagulant, explique ce résultat. À l'inverse, une augmentation de la concentration de coagulant («36h à 40h») à la filière A conduit à des gains de rendements. Le procédé de recirculation, tel que mis en oeuvre au CÉRS, a donc été directement influencée par la concentration de coagulant et ce, dans les mêmes proportions qu'un système classique de coagulation-floculation.

Par ailleurs, une modification du lieu d'injection du coagulant a également été examinée lors de cette séquence d'essais. À cette fin, son lieu d'injection a été rapproché du point d'introduction de la boue au procédé afin que ces deux produits puissent entrer en contact l'un avec l'autre. Cette modification cherchait ainsi à simuler, dans la mesure du possible, l'introduction du coagulant avant la boue. Les résultats de travaux antérieurs (Gupta et Ham 1983; Lanham *et al.* 1984; Monette *et al.* 1999b) précisent les bénéfices d'une telle pratique. L'injection du coagulant a donc été transférée des canaux *Parshall* vers les mélangeurs rapides (figure 1a) durant les périodes correspondant aux groupes d'heures «16h à 20h» et «20h à 24h». Comme en témoigne la figure 4b, le changement contribue à un abattement additionnel de MES à la filière A. Dans le cas du phosphore total, bien que la

recirculation ne conduit pas à des abattements supplémentaires, le changement apporté limite les écarts de rendements entre les deux filières. Le nombre très limité de résultats incite à considérer ces tendances avec circonspection.

Enfin, l'analyse générale des écarts de rendements entre les deux filières, en relation avec les concentrations d'adjuvant de floculation injectées, ne conduit à aucune tendance précise.

Échantillons instantanés

Globalement, les résultats instantanés obtenus lors de la seconde séquence sont en accord avec ceux des échantillons composés et de la séquence d'essais I. Sans tenir compte des conditions spécifiques d'essais, 39 échantillons instantanés sur un total de 50 prélevés montrent des turbidités résiduelles plus faibles à la filière B qu'à la filière A, bien qu'une concentration plus élevée d'adjuvant de floculation ait été injectée dans cette dernière.

L'analyse des résultats révèle que les rendements de la filière A sont particulièrement affectés lorsque la concentration de coagulant est élevée. Ces conditions se visualisent aux périodes «18h à 23h», «40h à 47h» et «62h à 64h» par une dégradation significative de l'effluent de la filière A (figures 5a et 5c). La concentration importante de MES observées dans les eaux du flocculateur de la filière A (figure 5b) pourrait cependant expliquer les écarts de rendements entre les deux filières durant les heures «40 à 47». Par ailleurs, seule la période «7h à 12h» permet d'évaluer de manière isolée le comportement du procédé à plus faible concentration de coagulant. Bien que le nombre de données soit limité, des

écarts de rendements moins significatifs sont remarqués entre les filières. Ces résultats corroborent ceux obtenus à la séquence d'essais I.

De manière plus spécifique, deux périodes d'essais ont permis de vérifier l'effet indépendant de la concentration du coagulant sur la filière A. La première («31,5h à 34h») a consisté à une diminution substantielle de la concentration de coagulant, de l'ordre de 33% par rapport à la filière B (figure 5c). Comme en témoigne la figure 5a, cette diminution a mené à une dégradation de la qualité de l'eau traitée de la filière A. La seconde période («34,5h à 39h») a, quant à elle, conduit à une augmentation de la concentration de coagulant (figure 5c), également de l'ordre de 33% par rapport à la filière B. Cette augmentation a contribué à une amélioration rapide de la qualité de l'eau traitée de la filière A (figure 5a). Durant ces périodes, la concentration d'adjuvant de floculation est demeurée constante à une valeur de près de 0,75 mg/L (figure 5d). Les MES observées au flocculateur ont toutefois varié sensiblement, notamment durant la seconde période couvrant les heures «34,5 à 39». Peu importe les conditions d'essais, le procédé a réagi aux modifications de concentrations de coagulant de manière analogue à un système classique de coagulation floculation.

Par ailleurs, telles qu'illustré par la figure 5c, diverses expériences de transferts du lieu d'injection du coagulant, des canaux *Parshall* vers le mélangeur rapide, ont été tentées. Le premier transfert, à la filière A (heure «11»), a conduit à une augmentation rapide de la turbidité de l'eau traitée (figure 5a), laissant supposer que le contact de la boue avec le coagulant n'améliore pas la situation. Le temps de réaction plus court du coagulant, qui correspond à la période écoulée entre l'injection du coagulant et celui de l'adjuvant de floculation, pourrait toutefois expliquer les rendements observés. Le second

transfert, à la filière B (heure «15»), montre qu'une réduction du temps de contact du coagulant contribue à une dégradation momentanée de la qualité de l'eau de cette filière. La qualité de l'eau devient ensuite supérieure à la filière A durant la période correspondant aux heures «17,5 à 23». Le rapprochement du lieu d'injection du coagulant du point d'introduction de la boue n'améliore donc pas réellement les rendements de la filière A (avec recirculation). À l'heure «23», l'injection du coagulant des deux filières a à nouveau été transférée aux canaux *Parshall* afin d'améliorer la qualité générale des eaux traitées.

Une seconde expérience a également été tentée lors de la dernière journée d'essais (heures «55,5 à 62,5»). Elle consistait à transférer l'injection du coagulant de la filière B au mélangeur rapide, puis à comparer les résultats des deux filières. Bien que le temps de contact du coagulant soit plus court à la filière B, les rendements ont été plutôt équivalents à ceux de la filière A. De meilleurs rendements à la filière A se distinguent même durant la période «57,5h à 59h». Une chute importante de la concentration d'adjuvant de floculation à la filière B doit cependant être remarquée. Comme en témoigne la figure 5c, les problèmes liés au transport du coagulant (absence d'eau de service) vers le mélangeur rapide de la filière B ne semble pas affecter son rendement par rapport à la filière A.

Ces résultats portent à conclure que le lieu d'injection du coagulant, identifié initialement comme cause potentielle des difficultés de traitement observées à la filière A lors des essais, ne serait pas un paramètre très critique. Les déplacements des lieux d'injection de coagulant des deux filières vers les mélangeurs rapides auraient dû, du moins théoriquement, contribuer à une amélioration des rendements de la filière A par rapport à la filière témoin B. Les essais précédents, menés en

laboratoire (Monette *et al.* 1999b) dans le but de déterminer le lieu optimal d'introduction de la boue, n'ont toutefois pas été réalisés dans des conditions qui correspondaient parfaitement à la réalité du CÉRS.

L'analyse des variations de concentrations d'adjuvant de floculation ne révèle pas d'impacts précis sur l'abattement de la turbidité instantanée. En effet, la concentration d'adjuvant a été fortement augmentée à quatre reprises (heures «10», «12,5», «17» et «58,5») sans pour autant conduire à de meilleurs rendements. Les concentrations choisies ne semblent pas avoir limité la performance du procédé de recirculation. Les résultats démontrent toujours la nécessité d'injecter une concentration plus importante d'adjuvant de floculation lorsqu'une boue est recirculée. En pratique, sa concentration doit être ajustée de manière similaire à un système classique de coagulation-floculation, soit en fonction des besoins d'agrégation des floes. Dans le cas d'un ajustement inadéquat, les rendements seront perturbés significativement tel que démontré lors de la première séquence d'essais (heures «67h à 69h») lors des difficultés de fonctionnement de la pompe-doseuse.

À la lumière des résultats de mesures de MES aux flocculateurs, le système n'a toujours pas atteint un équilibre particulier. Cette conclusion rejoint celle de la première séquence d'essais qui démontrait également des pertes de contrôle du flux de boues recirculées. La figure 5b permet d'ailleurs d'en juger. En effet, les MES augmentent de manière significative au fil de chacune des trois journées d'essais avec des fluctuations plus importantes lors du dernier jour. Ce manque de contrôle a nécessité l'arrêt complet de la recirculation entre les heures «52» et «55,5» afin d'améliorer la qualité des eaux traitées.

3.1.3. Boues générées par recirculation Le tableau 4 regroupe les résultats d'analyses quotidiennes de boues lors des séquences d'essais I et II. D'abord, les valeurs de POR des boues échantillonnées à la filière A sont demeurées assez voisines de celles de la filière témoin B. Le POR indique la tendance d'une solution (eau, boue liquéfiée, etc.) à capter ou céder des électrons; en d'autres mots, il reflète le caractère oxydant ou réducteur d'un environnement. Ainsi, sa valeur devrait normalement diminuer en fonction du taux de digestion, qui dépend notamment de l'âge des boues. Toutefois, puisqu'une boue constitue un milieu complexe, les valeurs doivent être considérées sur une base comparative plutôt qu'absolue. Les valeurs de POR indiquent que le vieillissement de la boue, occasionné par sa recirculation successive, n'a pas accentué l'activité microbiologique et, par le fait même, les inconvénients qui y sont normalement rattachés. De plus, les valeurs positives de POR portent à conclure que les boues ont conservé leur caractère oxydant. Ces résultats s'expliquent par la faible température de l'eau (7°C), qui limite l'activité microbiologique, par la concentration résiduelle élevée en oxygène dissous (liée à la température) et par les valeurs modérées des taux de recirculation de boues qui ont assuré leur renouvellement rapide. Cette situation pourrait cependant évoluer en périodes estivales alors que l'activité microbiologique s'intensifie.

À l'exception d'un seul résultat, toutes les valeurs de siccité des boues de la filière A sont supérieures à celles de la filière B. Ces résultats étaient prévus et confirment les conclusions tirées lors de travaux précédents (Monette *et al.* 1999a). L'ajout d'une concentration supplémentaire d'adjuvant de floculation contribuerait à une décantation rapide et efficace des boues produites et à l'augmentation de leur siccité. De plus, la masse de boues plus importante à la filière A favoriserait leur compression au fond des décanteurs. En effet, les valeurs de MES au flocculateur de la filière A sont en parfaite

corrélation avec ceux de siccité de boues (coefficient de corrélation $r = + 0,95$; $n = 8$). L'effet de compression de boues serait donc nettement plus important lorsque la recirculation est réalisée, notamment lorsque son taux est élevé. Les données ne permettent pas de préciser les contributions respectives de l'adjuvant de floculation et de la compression au processus d'épaississement.

Par ailleurs, deux types de tests ont permis de vérifier la facilité avec laquelle une boue se déshydrate après conditionnement. Le premier, le test de temps de succion capillaire (TSC), permet de juger de la facilité avec laquelle une boue laisse migrer son eau interstitielle par capillarité sur un filtre (Vesilind 1988). Le second, le test de filtration sous vide, conduit au calcul de la résistance spécifique « r » de la boue (Metcalf & Eddy 1991).

D'abord, les figures 6a et 6b présentent les résultats des tests de TSC réalisés sur les boues extraites des filières A et B au jour 1 des séquences d'essais I et II. Ces figures sont représentatives, par leurs tendances, de l'ensemble des résultats des autres journées d'essais. Comme elles en témoignent, pour de faibles concentrations de conditionneur, les valeurs de TSC sont systématiquement plus élevées pour les boues extraites de la filière A (avec recirculation). Ces résultats conduisent à des valeurs de concentrations «optimales» de conditionneur légèrement supérieures pour la filière A. Toutefois, les valeurs minimales atteintes de TSC sont comparables, quelle que soit l'origine des boues, soit de 9 à 13 secondes pour les boues de la filière A et de 10 à 13 secondes pour celles de la filière B. Les différences de valeurs de TSC entre les deux boues sont surprenantes compte tenu que la concentration résiduelle d'adjuvant de floculation dans la boue de la filière A est plus importante que dans celle de la filière B. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces résultats :

- la maturation plus importante de la boue recirculée (filère A) pourrait contribuer à des modifications chimiques ou biologiques qui affecteraient son conditionnement. Cette maturation est intimement liée au taux de recirculation qui détermine la vitesse de renouvellement de la masse de boue dans le système;
- la turbulence induite par la pompe de recirculation de boues impliquerait une trituration et un fractionnement des particules qui la composent, nuisant alors au processus de conditionnement;
- la siccité initiale de la boue influencerait le processus de conditionnement, menant à des résultats de TSC différents pour les boues extraites de chacune des filières. Selon les résultats obtenus, la siccité dépendrait des MES au flocculateur (taux de recirculation) ainsi que de la concentration d'adjuvant de floculation employée;
- un effet antagoniste existerait entre l'adjuvant de floculation (anionique) résiduel dans la boue et le conditionneur (cationique) ajouté. Une certaine concentration de conditionneur serait nécessaire pour neutraliser les charges opposées de l'adjuvant de floculation présent en plus grande concentration dans la boue recirculée.

Compte tenu de la température de l'eau (7°C), des taux de recirculation obtenus et des valeurs de POR, la maturation de la boue ne constitue pas un facteur critique au point de nuire au conditionnement. Peu d'information existe quant aux facteurs exacts régissant le conditionnement et la déshydratation des boues. Toutefois, la présence d'une plus grande proportion de particules colloïdales contribue normalement à augmenter la surface totale de particules et, par conséquent, à accroître la consommation de conditionneur. La trituration de la boue par la pompe de recirculation mène certainement à la création de fines particules, influençant directement les résultats de TSC. La

turbidité de l'eau traitée, généralement supérieures à l'effluent de la filière A, supporte cette interprétation. L'effet antagoniste des deux polymères de charges opposées se vérifie difficilement et les données disponibles ne permettent pas de se faire une juste idée à ce sujet. Les siccités plus élevées des boues extraites de la filière A peuvent également être à l'origine des résultats obtenus. Cependant, les résultats de la figure 6b, découlant d'essais de conditionnement de boues à siccités comparables, ont mené aux mêmes tendances.

Ainsi, à la lumière des données disponibles, la seconde hypothèse s'avère la plus plausible. Les fines particules, plus nombreuses lorsqu'une boue est recirculée, régiraient le processus de conditionnement. L'effet du pompage des boues sera d'ailleurs abordé ultérieurement lors des essais complémentaires en laboratoire (§ 3.2.).

Des essais de filtration sous vide ont également été réalisés pour déterminer la résistance spécifique « r » des boues (tableau 4). Les valeurs obtenues révèlent que les boues extraites à la filière A sont plus difficiles à déshydrater. Six des huit échantillons de boues présentent des valeurs de résistance spécifique plus élevées. Ces résultats s'expliquent par la siccité différente des boues des deux filières. En effet, une certaine corrélation existerait entre la siccité de la boue, qui dépend fortement des MES présentes au flocculateur (et du taux de recirculation), et sa résistance spécifique. Comme en témoignent les valeurs indiquées au tableau 4, les différences de résistance spécifique observées augmentent proportionnellement avec les écarts de siccité entre les boues. Le peu de données ne permet pas de tirer de conclusions fermes quant à la résistance spécifique à siccité égale. Cependant, les essais du jour 5 (séquence I) et du jour 1 (séquence II), réalisés lorsque les boues des

deux filières présentaient des siccités équivalentes, révèlent des résistances spécifiques comparables. Un autre essai, conduit lorsque la boue de la filière A présente une siccité plus faible, mène également à une résistance spécifique plus faible.

En résumé, la résistance spécifique «*r*» des boues recirculées ne serait pas plus grande, à concentration de conditionneur et à siccité égales, que celle d'une boue issue d'une coagulation-floculation classique. Les résultats de TSC, qui ont montré des rythmes d'évacuation de l'eau interstitielle des boues conditionnées différents d'une filière à l'autre, même à siccité comparable, n'impliquent pas forcément l'obtention de valeurs de résistance spécifique différentes. Toutefois, en pratique, en raison de la siccité plus élevée des boues recirculées, la résistance spécifique et les concentrations de conditionneur seront plus grandes. Ces résultats ne corroborent pas parfaitement ceux obtenus lors de précédents travaux (Monette *et al.* 1999a) mais permettent d'en préciser plusieurs aspects.

3.2. ESSAIS COMPLÉMENTAIRES EN LABORATOIRE

La trituration de la boue par la pompe de refoulement pourrait être responsable, du moins en partie, des rendements inférieurs observés à la filière A lors des essais menées au CÉRS. La turbidité, généralement plus élevée à l'effluent de la filière A, laisse croire que la turbulence induite par la pompe de recirculation entraîne le fractionnement des floccs en de fines particules. La turbidité créée serait particulièrement difficile à éliminer lors des étapes de floculation-décantation qui suivent l'introduction de la boue. Elle contribuerait également à une modification du processus de

conditionnement des boues résultantes. La série d'essais I vise donc à répondre à la problématique associée au pompage mécanique des boues. Tel que spécifiée précédemment (§ 2.2.2.), cette série d'essais a été précédée de tests de décantation sur les deux boues étudiées, la première extraite directement de la fosse du décanteur par un écoulement gravitaire (sans pompage), la seconde obtenue suite à son refoulement par la pompe de recirculation (un seul cycle de pompage). Ces tests visent spécifiquement à vérifier, par un suivi de la vitesse de chute des interfaces «eau-boue», le niveau de trituration de la boue recirculée.

Par ailleurs, certains travaux de recherche (Gupta et Ham 1983; Lanham *et al.* 1984; Monette *et al.* 1999b) ont déjà démontré les bénéfices d'une recirculation conduite en amont des injections de coagulant et d'adjuvant de floculation. Lors des séquences d'essais au CÉRS, les infrastructures de recirculation disponibles ne permettaient pas une telle pratique. Aussi, la boue a-t-elle été introduite après le coagulant, soit tout juste avant celle de l'adjuvant de floculation. Cette séquence d'introduction des réactifs pourrait être également responsable, du moins en partie, des moins bonnes performances de la filière A. La série d'essais II cherche donc à répondre à cette seconde problématique en comparant les deux séquences (procédures n° 1 et n° 2) d'introduction de réactifs.

3.2.1. Tests de décantation de boues La figure 7a compare la chute de l'interface de la boue extraite de la fosse du décanteur (sans pompage) et celle de la boue prélevée après son refoulement par la pompe de recirculation. L'analyse des courbes tracées révèle une chute nettement plus rapide de la boue extraite de la fosse du décanteur. Ce résultat confirme les effets de trituration de la pompe sur la boue et les impacts anticipés sur les rendements de coagulation-floculation. Les courbes de la

figure 7b, obtenues suite à un autre prélèvement de boues au CÉRS (fraction volatile des boues = 0,67), valident ces résultats. Les allures différentes des courbes des figures 7a et 7b s'expliquent par une siccité initiale (ajustées) différentes des boues testées.

La faible vitesse de chute de l'interface de la boue «pompée» s'expliquerait par le fractionnement de ses flocs qui implique la perte d'une partie de leurs propriétés acquises lors des étapes de coagulation-floculation. En effet, selon les théories classiques associées à la chute de particules dans l'eau en régime laminaire (loi de *Stokes*; $N_R \leq 1$), la vitesse de décantation d'une particule est directement proportionnelle au carré de son diamètre (Metcalf & Eddy 1991). Bien que la décantation observée lors des essais relève également d'un phénomène de type «freinée», la diminution de la taille des particules présente un impact marqué sur la vitesse de chute globale de l'interface. L'agglomération de ces plus petites particules suite à leur recirculation semble nettement plus difficile, d'autant plus que la réintroduction de la boue au procédé s'effectue tout juste avant celle de l'adjuvant de floculation et après celle du coagulant.

3.2.2. Série d'essais complémentaires I Les figures 8a et 8b comparent les résultats des essais de coagulation-floculation réalisés avec la boue extraite de la fosse du décanteur et celle prélevée suite à son refoulement par la pompe. Globalement, les résultats montrent des gains de rendements plus significatifs lorsque la boue extraite de la fosse du décanteur est recirculée. Dans le cas du phosphore total (figure 8a), les décalages observés sont négligeables à faibles concentrations d'adjuvant de floculation mais augmentent peu à peu pour devenir maximaux lorsque la concentration d'adjuvant atteint 0,5 mg/L. Quant aux MES, des gains de rendements sont systématiquement

observés lorsque la boue extraite du décanteur est recirculée, peu importe les concentrations d'adjuvant (figure 8b). Les résultats de turbidité (non-présentés) suivent également cette tendance générale.

La comparaison des valeurs résiduelles de phosphore total et de MES avec celles des essais témoins (sans recirculation; 0,4 mg/L d'adjuvant de floculation) révèle que la recirculation permet d'améliorer de manière significative les rendements épuratoires. Sans égard à la concentration d'adjuvant de floculation employée lors des essais de recirculation, des abattements supplémentaires de 0,46 mg-P/L et 18 mg/L sont respectivement observés pour le phosphore total et les MES lorsque la boue extraite du décanteur est recirculée. Dans le cas de la boue «pompée», ces mêmes abattements atteignent respectivement 0,30 mg-P/L et 14 mg/L. La pompe de recirculation présente donc un impact négatif plus important sur l'enlèvement du phosphore total que celui des MES. La présence de précipités (ou micro-flocs) contenant des phosphates et émergeant de la boue lors de son pompage expliquerait ces résultats. L'augmentation de la concentration de coagulant, bien que non souhaitable, permettrait de compenser pour ces effets, à condition que la boue soit ajoutée avant le coagulant.

3.2.3. Série d'essais complémentaires II Les figures 8c et 8d illustrent les résultats des essais de coagulation-floculation conduits selon les procédures n°1 et n°2, correspondant respectivement à des recirculations de boues avant l'ajout du coagulant, et après l'ajout du coagulant (tout juste avant celui de l'adjuvant de floculation). L'analyse des résultats de phosphore total et de MES dans l'eau traitée révèle un très léger avantage associé à la procédure n°1. Cet avantage devient par contre

tout à fait inexistant à plus fortes concentrations d'adjuvant de floculation. Ainsi, un ajustement adéquat de sa concentration permet d'éliminer tout écart de rendements entre les deux lieux d'introduction de la boue. Les résultats de turbidité (non présentés) témoignent également de tendances assez similaires.

La comparaison des résultats avec ceux des essais témoins (sans recirculation; 0,4 mg/L d'adjuvant de floculation) révèle que la procédure n°2 conduit à des gains de rendements respectifs de 0,50 mg-P/L et 18 mg/L pour le phosphore total et les MES. Ces résultats rejoignent assez bien ceux obtenus avec la boue extraite du décanteur (procédure n°1). La recirculation d'une boue après l'ajout de coagulant, mais tout juste avant celui de l'adjuvant de floculation, ne mène donc pas à une dégradation notable de la qualité de l'eau. La concentration d'adjuvant de floculation doit cependant être ajustée convenablement afin de bien tirer profit de la recirculation.

3.2.4. Bilan des essais complémentaires en laboratoire Les résultats obtenus permettent de conclure que la turbulence induite par la pompe de recirculation et le lieu d'introduction de la boue au procédé n'expliquent pas complètement les problèmes de traitement observés à la filière A lors des essais. En effet, bien que les résultats indiquent que la boue s'altère lors de son pompage et que certains impacts seront constatés à l'eau traitée, des gains significatifs de rendement sont tout de même remarqués par rapport à une coagulation-floculation classique. Ce même raisonnement vaut aussi pour le lieu d'introduction de la boue. Par conséquent, d'autres hypothèses devront être avancées pour préciser complètement les causes des difficultés de traitement rencontrées. Par ailleurs, les résultats des essais complémentaires permettent de supporter la thèse selon laquelle les boues

recirculées, triturées par la pompe, se conditionnent plus difficilement en raison de la présence d'une plus grande proportion de fines particules. La quantité de fines particules variera d'ailleurs selon la fréquence de pompage de la boue, qui dépend à son tour du taux de recirculation. Les effets néfastes de la pompe se remarquent particulièrement pour de faibles concentrations de conditionneur à boue.

3.3. EFFICACITÉ DU PROCÉDÉ DE RECIRCULATION À GRANDE ÉCHELLE

Les essais de recirculation de boues réalisés au CÉRS n'ont pas mené aux performances espérées. De manière générale, les rendements observés à la filière A (avec recirculation) ont été significativement inférieurs à ceux de la filière témoin B (coagulation-floculation classique). Dans cette optique, ces résultats signifient que la recirculation ne présente pas d'avantages économiques pour cette station. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées afin d'expliquer les résultats obtenus :

- trituration et fractionnement de la boue recirculée (ou floes) en de fines particules par la pompe de recirculation;
- lieu inadéquat d'introduction de la boue au procédé (chambre de mélange rapide, soit après le coagulant, mais tout juste avant l'adjuvant de floculation);
- infrastructures non-optimales pour intégrer la recirculation : géométrie et conception des équipements non adaptées et degré de contrôle de la recirculation insuffisant;
- conditions hydrauliques peu avantageuses : agitation excessive des floes formés menant à leur bris;
- déficience ou excès d'adjuvant de floculation;
- limitation de l'efficacité du procédé de recirculation à fortes concentrations de coagulant.

Bien que les résultats obtenus lors des essais complémentaires en laboratoire (§ 3.2.) aient démontré que la vitesse de décantation de la boue «pompée» était plus faible que celle de la boue extraite de la fosse des décanteurs, sa recirculation peut tout de même entraîner des gains de rendements par rapport à une coagulation-floculation classique. Par ailleurs, l'eau traitée se dégrade légèrement lorsque la boue «pompée» est recirculée. Cet effet, difficile à quantifier, doit être pris en considération lors de la mise en oeuvre de la recirculation.

Les essais complémentaires en laboratoire ont également démontré que la recirculation de boues, telle que pratiquée au CÉRS, conduisait à des gains significatifs de rendements par rapport à une coagulation-floculation classique. Les gains obtenus ont toutefois été légèrement inférieurs à ceux découlant d'une recirculation conduite en amont du lieu d'injection du coagulant. Le lieu d'introduction de la boue au procédé ne peut expliquer à lui seul les difficultés remarquées à la filière A. D'ailleurs, le transfert vers la chambre de mélange rapide du lieu d'injection du coagulant, dans le but d'assurer un contact plus direct de la boue avec le coagulant, n'a pas mené à des performances différentes. Par contre, cet essai ne constituait pas une véritable introduction de la boue avant l'injection du coagulant, mais plutôt un ajout simultané.

Les infrastructures particulières du CÉRS expliqueraient, du moins en partie, les problèmes rencontrés à la filière A. L'examen de la géométrie et de la conception du flocculateur et des deux décanteurs attenants révèle des dispositions physiques peu avantageuses pour le processus de recirculation. Comme en témoigne la figure 9, le passage de l'eau s'effectue obligatoirement par des ouvertures en profondeur, situées dans les cloisons séparant les flocculateurs des décanteurs, ce qui

implique un dépôt rapide des floccs dès leur entrée aux décanteurs. Les mécanismes de coagulation-floculation tels que l'entrappage et le balayage, identifiés comme prédominants lorsqu'une boue est recirculée (Monette *et al.* 1999a et 1999b), ne peuvent se réaliser pleinement et efficacement dans une telle configuration. En effet, les floccs formés se trouvent dans l'impossibilité d'assurer le «balayage» et la «filtration» du liquide sur toute la profondeur d'eau à l'étape de décantation. Le captage d'impuretés résiduelles s'en trouve fortement limité, ce qui empêche tout gain significatif de rendement.

De plus, les équipements en place au CÉRS n'ont pas permis d'atteindre un niveau de contrôle suffisant du flux massique de boues recirculées. Cette situation a mené à des variations et à des fluctuations incontrôlées du taux de recirculation au fil des essais, en plus de concourir à des problèmes de dépôts de boues au sein du flocculateur. Le choix de la concentration d'adjuvant de floculation devient hasardeux et l'eau traitée s'en trouve dégradée. La recirculation doit alors être arrêtée momentanément afin de rétablir la situation. Les problèmes reliés au contrôle du flux massique n'ont certainement pas été favorables au procédé.

Les conditions hydrauliques peuvent également être responsables d'une certaine dégradation de la qualité de l'eau. En effet, les floccs volumineux produits sont susceptibles d'être cisailés par les forces exercées lors des mouvements aléatoires de l'eau dans les flocculateurs, notamment lors du passage des eaux flocculées par les ouvertures séparant les flocculateurs des décanteurs (figure 9). Leur bris implique nécessairement une turbidité résiduelle supplémentaire à l'effluent.

De manière générale, les résultats laissent croire que la concentration d'adjuvant de floculation n'a pas été véritablement déficiente lors des essais. L'ajustement de sa concentration s'effectuait de manière comparable d'une filière à l'autre, par des relevés visuels des caractéristiques physiques des floes et de l'eau inter-floc le long des flocculateurs. D'un autre côté, un excès d'adjuvant de floculation est improbable puisqu'il mène généralement à la formation de floes filamenteux, repérables visuellement et qui décantent plus difficilement. Ce type de floes n'a pas été remarqué lors des séquences d'essais, du moins durant les heures de surveillances visuelles du procédé. Les difficultés observées à la filière A ne peuvent donc pas vraiment être expliquées par une déficience ou un excès d'adjuvant de floculation.

Finalement, les travaux précédents, réalisés en laboratoire et à l'échelle pilote (Monette *et al.* 1999b), ont démontré que les gains de rendements associés à la recirculation s'estompaient peu à peu avec l'augmentation de la concentration de coagulant. Cette situation s'explique par l'action préférentielle du coagulant sur les polluants aux dépens de celle de la boue (compétitivité). Ces travaux révélaient également qu'une concentration plus importante de coagulant ne contribuait pas à une dégradation de l'eau traitée, par rapport à une coagulation-floculation classique, à condition que la concentration d'adjuvant de floculation ne soit pas limitative. Toutefois, une forte concentration de coagulant restreindrait les effets bénéfiques de la recirculation. Les concentrations maximales étudiées lors de ces travaux atteignaient près de 2,4 mg- Al^{3+} /L alors que celles du CÉRS variaient entre 2,6 et 6,4 mg- Al^{3+} /L (moyenne \approx 4,0 \pm 1,0 mg- Al^{3+} /L). Dans cette perspective, les concentrations de coagulant employées ont certainement limité les gains prévus sans pour autant conditionner une détérioration de la performance du procédé de coagulation-floculation. Puisque la concentration d'adjuvant de

floculation n'aurait pas été limitative, les facteurs identifiés précédemment doivent alors, en toute logique, être considérés comme les causes des problèmes rencontrés.

En résumé, en assumant que les gains de rendements ont été initialement limités par les fortes concentrations de coagulant, les performances inférieures à la filière A s'expliquent essentiellement par des infrastructures inadéquates pour intégrer la recirculation. Plus précisément, la géométrie et la conception des équipements (floculateurs, décanteurs) ne favorisent pas les mécanismes d'entrappage et de balayage, identifiés comme prédominants lorsqu'une boue est recirculée. Les floccs formés ne peuvent contribuer au captage des impuretés lors de leur chute à l'étape de décantation. La turbidité résiduelle plus importante, généralement remarquée à la filière A, en est le reflet. De plus, la configuration de ces équipements ne crée pas les conditions hydrauliques idéales, notamment au niveau des ouvertures situées dans les cloisons séparant les floculateurs des décanteurs. Cette situation implique des risques de cisaillement des floccs formés. L'effet triturateur de la pompe doit également être considéré, au même titre que le lieu non-optimal d'introduction de la boue au procédé et le degré insuffisant de contrôle du flux massique de boues recirculées. Les résultats ne permettent toutefois pas de préciser l'importance relative de chacune des causes identifiées. Tous ces facteurs devront être considérés lors de la conception éventuelle d'équipements adaptés au processus de recirculation. Entre autres, un système d'entraînement à l'eau (hydro-éjecteur) pourrait être envisagé pour recirculer les boues avec un minimum de turbulences.

3.4. CONTRÔLE DE LA RECIRCULATION

Le contrôle du flux massique de boues s'avère essentiel au bon fonctionnement d'un procédé de coagulation-floculation intégrant la recirculation de boues. Les équipements mis en place doivent permettre l'ajustement du flux à tout moment avec une précision suffisamment élevée. À cet égard, le contrôle du flux massique n'a pu être réalisé pleinement et avec une justesse suffisante lors des séquences d'essais au CÉRS. Dans les faits, le contrôle de la recirculation reposait essentiellement sur un certain équilibre du système (non atteint) qui devait tendre vers un flux massique constant de boue recirculée, peu importe les variations des caractéristiques de l'eau affluente. Ce manque de contrôle a mené à des variations importantes de la concentration de MES au flocculateur à la filière A, tel qu'exprimé par les figures 3b et 5b. L'imprécision du réglage de la vanne de contrôle du débit et du débitmètre (conduite de recirculation) ainsi que la défectuosité des densimètres installés sur la conduite de refoulement ont principalement contribué à cette situation.

Lors d'une éventuelle intégration de la recirculation de boues à un système de coagulation-floculation classique, un mode de contrôle à flux massique variable devrait être préconisée. Il permettrait de conserver en tout temps une concentration constante de MES au flocculateur. La masse de solides au flocculateur est d'abord augmentée durant quelques heures dans le flocculateur-décanteur (diminution ou arrêt momentané du débit de purge des boues) jusqu'à l'atteinte de la concentration de MES souhaitée au flocculateur. Le flux massique de solides varie ensuite de manière à maintenir en tout temps la concentration de MES au flocculateur, peu importe l'évolution de la charge de l'eau brute ou la concentration de coagulant injecté. Le principal avantage de ce mode de contrôle réside dans la facilité d'ajustement des concentrations d'adjuvant de floculation en raison du maintien d'une masse constante de boue dans le flocculateur.

Peu importe le mode de contrôle qui sera adopté, chacun nécessite un ajustement précis du flux de solides recirculés, une estimation rapide des MES du flocculateur et l'instauration de boucles de contrôle automatisées du procédé. La mesure du flux massique peut être réalisée par le biais d'un turbidimètre à boues (plutôt que par des densimètres) et d'un débitmètre installé sur la conduite de recirculation. Par ailleurs, l'installation d'un turbidimètre au flocculateur permet d'évaluer en temps réel les MES présentes et de tenir compte des variations de charge de l'eau brute. Une boucle de contrôle assure ensuite le lien entre les lectures des turbidimètres et du débitmètre, et les réglages de la pompe de recirculation et de la vanne nécessaires à l'ajustement du flux de boue.

Ainsi, dans le but d'estimer le taux de recirculation et la qualité de son contrôle, les MES et la turbidité des eaux des flocculateurs des filières A et B ont été mesurées lors de la séquence d'essais I. La figure 10, qui présente une synthèse de l'ensemble des couples «MES : Turbidité» obtenus, révèle une excellente corrélation entre les deux paramètres avec un coefficient r^2 atteignant 0,94 ($n = 34$). Ainsi, lors de la réalisation de la seconde séquence d'essais, les MES ont pu être estimées rapidement à partir d'une simple analyse de turbidité, améliorant ainsi la qualité du suivi du procédé. Une vérification des résultats obtenus à la filière A uniquement a également mené à une valeur relativement élevée du coefficient r^2 (0,85; $n = 18$).

Les essais réalisés à grande échelle ont également démontré la flexibilité du procédé. En effet, le procédé réagit rapidement à toutes action faite dans le but de modifier ou même d'arrêter la recirculation de la boue. Certaines fluctuations, illustrées aux figures 3b et 5b, attestent de la rapidité avec laquelle les MES varient dans le flocculateur. Ces variations témoignent toutefois de l'importance

d'un bon niveau de contrôle du flux massique afin de tirer le meilleur profit de la recirculation.

4. CONCLUSIONS

Cette étude visait à améliorer les connaissances reliées à la mise en oeuvre de la recirculation de boues chimiques urbaines dans une station d'épuration existante. Du même coup, elle cherchait également à évaluer les performances du procédé et à valider les conclusions tirées lors des précédents travaux de recherche (Monette *et al.* 1999a et 1999b). Pour atteindre ces objectifs, deux séquences d'essais, de 113 et 64 heures respectivement, ont été conduites au *Centre d'épuration Rive-Sud*. Lors des essais, l'évolution de la qualité de l'eau traitée dans deux filières parallèles alimentées simultanément par une même eau brute, dont l'une intègre la recirculation, a été suivie. Des essais complémentaires ont également été menés en laboratoire pour améliorer le niveau de compréhension des résultats. La réalisation des essais permettent de tirer les conclusions générales suivantes :

- la recirculation, telle que mise en oeuvre au CÉRS, contribue à une dégradation significative de la qualité de l'eau par rapport à un procédé classique, et ce, même à une concentration supérieure d'adjuvant de floculation. De manière générale, des valeurs supérieures en MES, en phosphore total et en turbidité, ont été observées à la filière A (avec recirculation). Ces résultats ne corroborent pas ceux des travaux précédents qui avaient démontré les effets bénéfiques de la recirculation;
- les meilleures performances du procédé s'obtiennent lorsque la charge de l'eau brute et la concentration de coagulant sont faibles. La compétition existant entre les actions physiques ou

chimiques de la boue et celles du coagulant explique cette tendance (Monette *et al.* 1999b);

- le procédé se comporte de manière comparable à un système de coagulation-floculation classique en réagissant rapidement aux variations de charges de l'eau brute et de concentrations de réactifs. Ainsi, la recirculation ne contribue pas à absorber les variations de charges. De plus, le procédé répond immédiatement à toute modification du flux massique de boues recirculées;
- le système n'aurait pas atteint un équilibre particulier quant à la masse de boues recirculées. Un mode de contrôle du procédé, qui vise un flux massique variable et une concentration constante de MES dans le flocculateur, devrait être préconisé afin de faciliter l'ajustement de la concentration d'adjuvant de floculation;
- une excellente corrélation existe entre la concentration de MES et la teneur en turbidité au flocculateur. La mesure de la turbidité constituerait un outil indicateur simple, efficace et rapide, du taux de recirculation (coefficient $r^2 = 0,94$);
- les boues produites sont légèrement plus difficiles à conditionner en raison de la présence de fines particules générées par les turbulences induites par la pompe de recirculation. Les difficultés se révèlent plus particulièrement à de faibles concentrations de conditionneur;
- de manière générale, la recirculation mène à des valeurs supérieures de siccité de boue. Ce résultat s'expliquerait d'une part, par la concentration plus importante d'adjuvant de floculation injectée et, d'autre part, par la compression des boues présentes au fond des décanteurs. Une excellente corrélation existe d'ailleurs entre la teneur en MES observée au flocculateur et la siccité des boues;
- à siccité égale, la résistance spécifique « r » d'une boue recirculée serait comparable à celle d'une boue issue d'une coagulation-floculation classique. Toutefois, en pratique, en raison de la siccité plus importante des boues recirculées, la concentration de conditionneur et la valeur de résistance

spécifique sont plus élevées;

- la recirculation de boues n'implique pas de problème particulier de maturation ou de production de gaz. Cet aspect devra toutefois faire l'objet d'une attention particulière en périodes estivales.

Les performances observées lors des essais ne permettent pas d'envisager l'intégration de la recirculation de boues au CÉRS, ni d'espérer d'avantages économiques. Les difficultés rencontrées s'expliquent globalement par des infrastructures inadéquates pour intégrer la recirculation, jumelées au fait que les fortes concentrations de coagulant employées au CÉRS ont nécessairement limité les gains potentiels de rendement associés à la recirculation (Monette *et al.* 1999b). Plus spécifiquement, la géométrie et la conception des équipements (floculateurs, décanteurs) à cette station ne favorisent pas le «balayage» et la «filtration» du liquide par les floccs sur toute la profondeur de l'eau lors de la décantation, ce qui limite le captage d'impuretés résiduelles. La disposition des équipements n'offre également pas de conditions hydrauliques idéales, ce qui implique des risques de cisaillement des floccs formés. De même, de fines particules sont générées par la turbulence induite par la pompe de recirculation de boues. Enfin, les performances du procédé sont certainement contraintes par un lieu non-optimal d'introduction des boues et un degré de contrôle insuffisant du flux massique recirculées.

Les essais conduits au CÉRS montrent l'ampleur de la problématique associée à l'intégration de la recirculation dans une station d'épuration existante. À lumière des données disponibles, les causes des difficultés de fonctionnement rencontrées s'avèrent nettement plus de nature physique que chimique. Pour cette raison, les bienfaits de la recirculation de boues sur le procédé de coagulation-floculation ne sont pas complètement remis en question. Les recherches futures devront être

orientées de manière à contourner les problèmes concrets d'application à grande échelle. Elles devront, entre autres, tenir compte des conditions minimales nécessaires au bon fonctionnement du procédé.

REMERCIEMENTS

L'auteur principal tient à remercier le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF), par le biais du Fonds de recherche et de développement technologique en environnement, pour son support financier. Cette étude s'inscrivait au volet 3 des orientations stratégiques du MEF portant sur la recherche et le développement de procédés de récupération et de revalorisation des sels métalliques. Des remerciements doivent également être adressés au personnel du *Centre d'épuration Rive-Sud* pour leur étroite collaboration ainsi qu'au Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) et au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) pour leur soutien financier.

BIBLIOGRAPHIE

American Public Health Association, American Water Works Association, et Water Environment Federation 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19^e éd. *Éditeurs* : American Public Health Association. Washington, D.C. 1 108 p.

American Society of Civil Engineers & American Water Works Association 1990. Water treatment

plant design. 2^e éd. McGraw-Hill Publishing Company. 598 p.

Bishop, S.L., et Cichon, E.J. 1984. Upflow clarification of New England surface water supplies. *Journal of the New England Water Works Association*, **98**(3) : 215-236.

Cailleaux, C., Pujol, E., De Dianous, F., et Druoton, J.C. 1992. Study of weighted flocculation in view of a new type of clarifier. *Aqua*, **41**(1) : 18-27.

Dauthuille, P. 1988. Le DENSADeg : un nouveau décanteur à hautes performances. *Techniques, Sciences, Méthodes : génie urbain et génie rural*, **88**(2) : 63-72.

Eckenfelder, W.W. 1982. Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. *Technique & Documentation* Lavoisier. Paris. 503 p.

Ficquette, B.N. 1981. Color removal from groundwater by ion exchange and sludge recycle techniques. *Mémoire de maîtrise*. Mississippi State University, Water Resources Research Institute. 131 p.

Gupta, K.B., et Ham, R.K. 1983. An evaluation of effects and interaction of variables on a solids-liquid separation process with and without using recycled flocs. *American Institute of Chemical Engineers, National Meeting*. New York, 30 p.

Lanham, R.M., Tsai, K.-C., et Hubbs, S.A. 1984. Recycling of preformed alum sludge in the coagulation process. Proceedings - American Water Works Association Annual Conference 1984. Denver, CO. pp. 491-506.

Lavoie, J-Y., et Meloche, F. 1993. Valorisation des boues d'alun d'une usine de traitement d'eau potable pour le traitement des eaux usées. Sciences et techniques de l'eau, 26(2) : 111-118.

Metcalf & Eddy, Inc. 1991. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. 3^e éd. McGraw-Hill, Inc., Boston. 1334 p.

Monette, F., Brière, F.G., Létourneau, M., Duchesne, M., et Hausler, R. 1999a. Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : performance générale et stabilité du procédé. Soumis à la Revue canadienne de génie civil. 52 p.

Monette, F., Brière, F.G., Létourneau, M., Duchesne, M., et Hausler, R. 1999b. Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques : influence des réactifs. Soumis à la Revue canadienne de génie civil. 54 p.

Pallo, P.E., Schwartz, B.J., et Wang, L.K. 1972. Recycling and reuse of filter backwash water containing alum sludge. Water & Sewage Works, 119(5) : 123-125.

Thomas, E.A. 1972. Phosphate removal by recirculating iron sludge. Journal of the Water Pollution

and Control Federation. 44(2) : 176-182.

Vesilind, P.A. 1988. Capillary suction time as a fundamental measure of sludge dewaterability. Journal of Water Pollution Control Federation, 60(2) : 215-220.

Wilson, T.E., Bizzarri, R.E., Burke, T., Langdon, P.E.Jr., et Courson, C.M. 1975. Upgrading primary treatment with chemicals and water treatment sludge. Journal of the Water Pollution and Control Federation, 47(12) : 2820-2833.

LISTE DES SYMBOLES

CÉRS	Centre d'épuration Rive-Sud
DCO	demande chimique en oxygène
MES	matières en suspension
MS	matières sèches de boue
n	nombre d'observations
N_R	nombre de Reynolds
P total	phosphore total
POR	potentiel d'oxydo-réduction
r	résistance spécifique de la boue
TSC	temps de succion capillaire

Tableau 1. Concentrations de réactifs étudiés (Séries I et II en béchers).

Concentrations étudiées de chacun des réactifs				
Série I				
Réactifs injectés	Unités	Procédure n° 1 Boue pompée ^a	Série II	
			Procédure n° 1 Boue gravitaire ^b	Procédure n° 2 Boue gravitaire ^b
Coagulant (alun)	mg-Al ³⁺ /L	2,0	2,0	2,0
Adjuvant de floculation (Percol 902)	mg/L	0,3	0,3	0,3
		0,4	0,4	0,4
		0,5	0,5	0,5
		0,6	0,6	0,6
Boue d'alun	mg-MES/L	0 ^c	0 ^c	0 ^c
		200	200	200

a : boue de la fosse du décanteur obtenue par pompage (suite à son refoulement par la pompe de recirculation).

b : boue de la fosse du décanteur obtenue par écoulement gravitaire (sans pompage).

c : essais témoins (coagulant : 2,0 mg-Al³⁺/L; adjuvant de floculation : 0,4 mg/L; boue d'alun : 0 mg-MES/L).

Tableau 2. Concentrations des réactifs chimiques et débits d'eau usée (échantillons composés, séquence I).

Unités		Groupes d'heures ^a											
		9h à 17h	17h à 25h	25h à 33h	33h à 41h	41h à 49h	49h à 57h	57h à 65h	65h à 73h	73h à 81h	81h à 89h	97h à 105h	105h à 113h
Filière A (avec recirculation)													
Coagulant (alum)	mg-Al ³⁺ /L	2,58	3,56	4,02	3,72	4,13	3,48	2,94	3,75	3,13	3,06	3,78	3,31
Adjuvant de floculation (PAM 703)	mg/L	0,58	0,67	0,70	0,75	0,78	0,74	0,74	0,75	0,85	0,76	0,82	0,81
Débit	m ³ /d	101 005	94 065	74 495	84 360	87 365	87 415	106 160	97 070	70 410	80 180	62 655	74 785
Filière B (sans recirculation)													
Coagulant (alum)	mg-Al ³⁺ /L	2,58	3,56	4,03	3,72	4,13	3,47	2,93	3,76	3,15	3,06	3,78	3,31
Adjuvant de floculation (PAM 703)	mg/L	0,36	0,42	0,33	0,36	0,39	0,44	0,43	0,45	0,46	0,40	0,37	0,39
Débit	m ³ /d	100 970	93 805	74 050	83 525	86 970	87 750	107 115	98 015	72 380	80 805	61 765	73 670

^a : démarrage de la recirculation à 00h.

Tableau 3. Concentrations des réactifs chimiques et débits d'eau usée (échantillons composés, séquence II).

Unités		Groupes d'heures ^a											
		8h à 12h	12h à 16h	16h à 20h	20h à 24h	24h à 32h	32h à 36h	36h à 40h	40h à 44h	44h à 48h	48h à 56h	56h à 60h	60h à 64h
Filière A (avec recirculation)													
Coagulant (alun)	mg-Al ³⁺ /L	3,13	3,55	5,19	6,38	4,79	2,79	5,15	4,63	5,15	5,25	3,90	5,19
Adjuvant de floculation (PAM 703)	mg/L	0,62	0,69	0,73	0,78	0,73	0,75	0,75	0,73	0,72	0,77	0,77	0,85
Débit	m ³ /d	66 275	68 375	60 340	70 780	56 885	66 190	71 420	68 045	66 340	50 330	54 515	70 765
Filière B (sans recirculation)													
Coagulant (alun)	mg-Al ³⁺ /L	3,17	3,53	5,18	6,34	4,97	3,36	4,06	4,61	5,19	5,22	3,90	5,24
Adjuvant de floculation (PAM 703)	mg/L	0,47	0,41	0,48	0,56	0,50	0,45	0,45	0,43	0,43	0,48	0,45	0,54
Débit	m ³ /d	66 725	69 950	60 890	72 565	57 440	67 125	72 740	69 510	67 015	50 970	55 765	72 150

^a : démarrage de la recirculation à 00h.

Tableau 4. Caractéristiques des boues extraites des décanteurs (séquences d'essais I et II).

Séquence et jour	Filière	POR ^a	Siccité	MES au floculateur ^b	Concentration d'adjuvant de floculation ^c	Concentration de conditionneur	Résistance spécifique de la boue
		mV	%	mg/L	mg/L	kg/t MS ^c	m/kg
I-1	A	200	3,46	258	0,60	2,31	$1,9 \times 10^{14}$
	B	265	1,35	109	0,35	2,31	$1,2 \times 10^{13}$
I-2	A	100	3,91	376	0,70	2,60	$3,0 \times 10^{14}$
	B	94	1,84	101	0,33	2,60	$3,8 \times 10^{13}$
I-3	A	200	4,30	347	0,74	2,00	$1,4 \times 10^{15}$
	B	180	1,82	88	0,42	2,00	$1,2 \times 10^{13}$
I-4	A	220	1,76	206	0,80	2,00	$6,6 \times 10^{12}$
	B	217	1,10	83	0,39	2,00	$3,0 \times 10^{12}$
I-5	A	---	1,46	137	0,80	2,00	$1,9 \times 10^{13}$
	B	---	1,42	66	0,38	2,00	$3,1 \times 10^{13}$
II-1	A	20	1,43	88	0,66	1,80	$2,4 \times 10^{13}$
	B	20	1,37	70	0,42	1,80	$1,4 \times 10^{13}$
II-2	A	225	0,83	84	0,74	2,00	$6,5 \times 10^{12}$
	B	150	1,56	64	0,44	2,00	$3,6 \times 10^{13}$
II-3	A	190	1,98	169	0,80	1,70	$4,5 \times 10^{14}$
	B	130	1,50	90	0,45	1,70	$1,1 \times 10^{13}$

a : potentiel d'oxydo-réduction.

b : moyenne des valeurs observées durant les heures précédant le prélèvement de la boue.

c : kg/tonne de matières sèches de boue.

Fig. 1. Schéma des installations au Centre d'épuration Rive-Sud : (a) filières de traitement des eaux usées et (b) infrastructures de recirculation des boues.

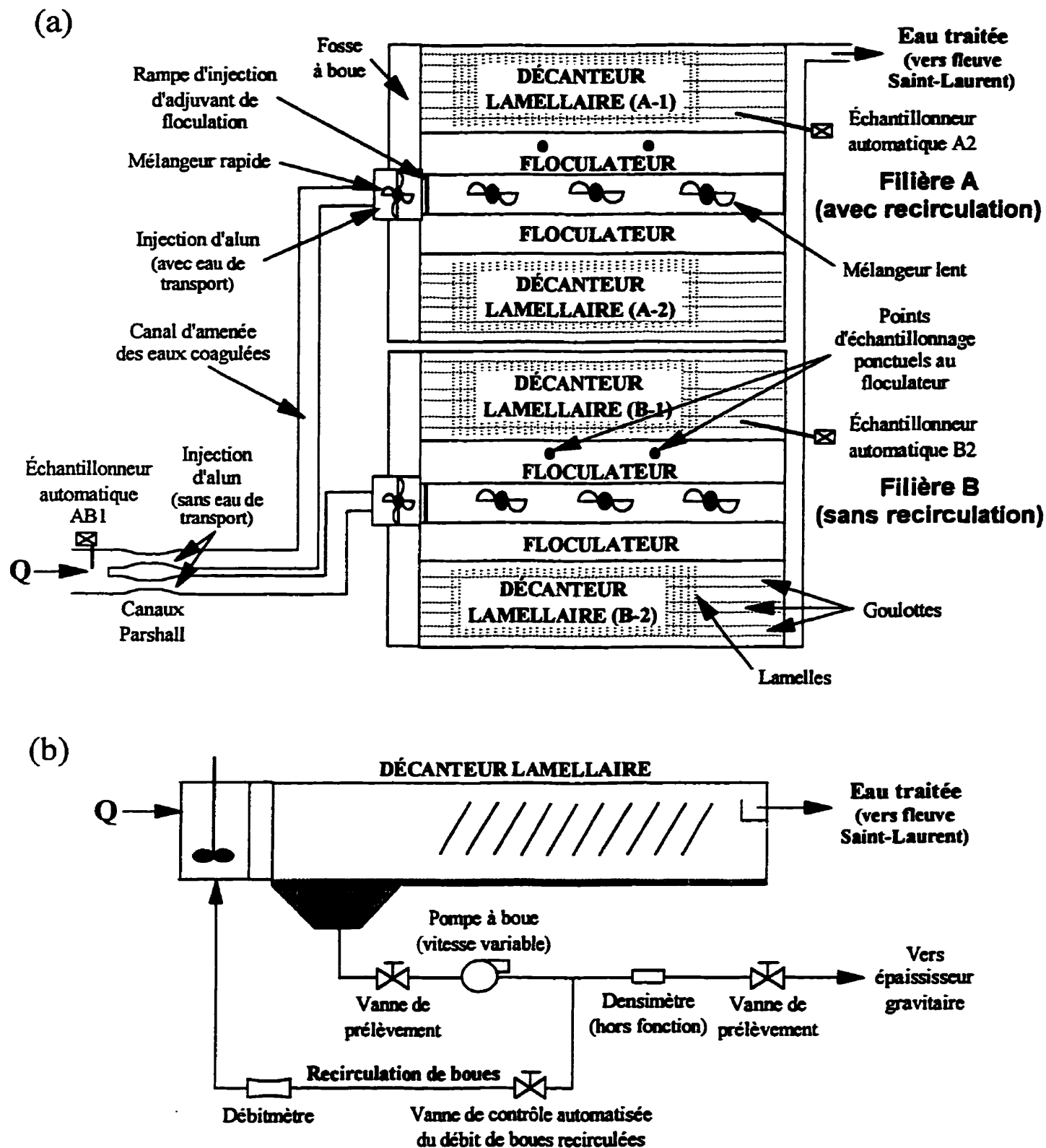


Fig. 2. Résultats (a) de phosphore total et (b) de MES lors de la séquence d'essais I au *Centre d'épuration Rive-Sud*; échantillons composés; démarrage de la recirculation à 00h.

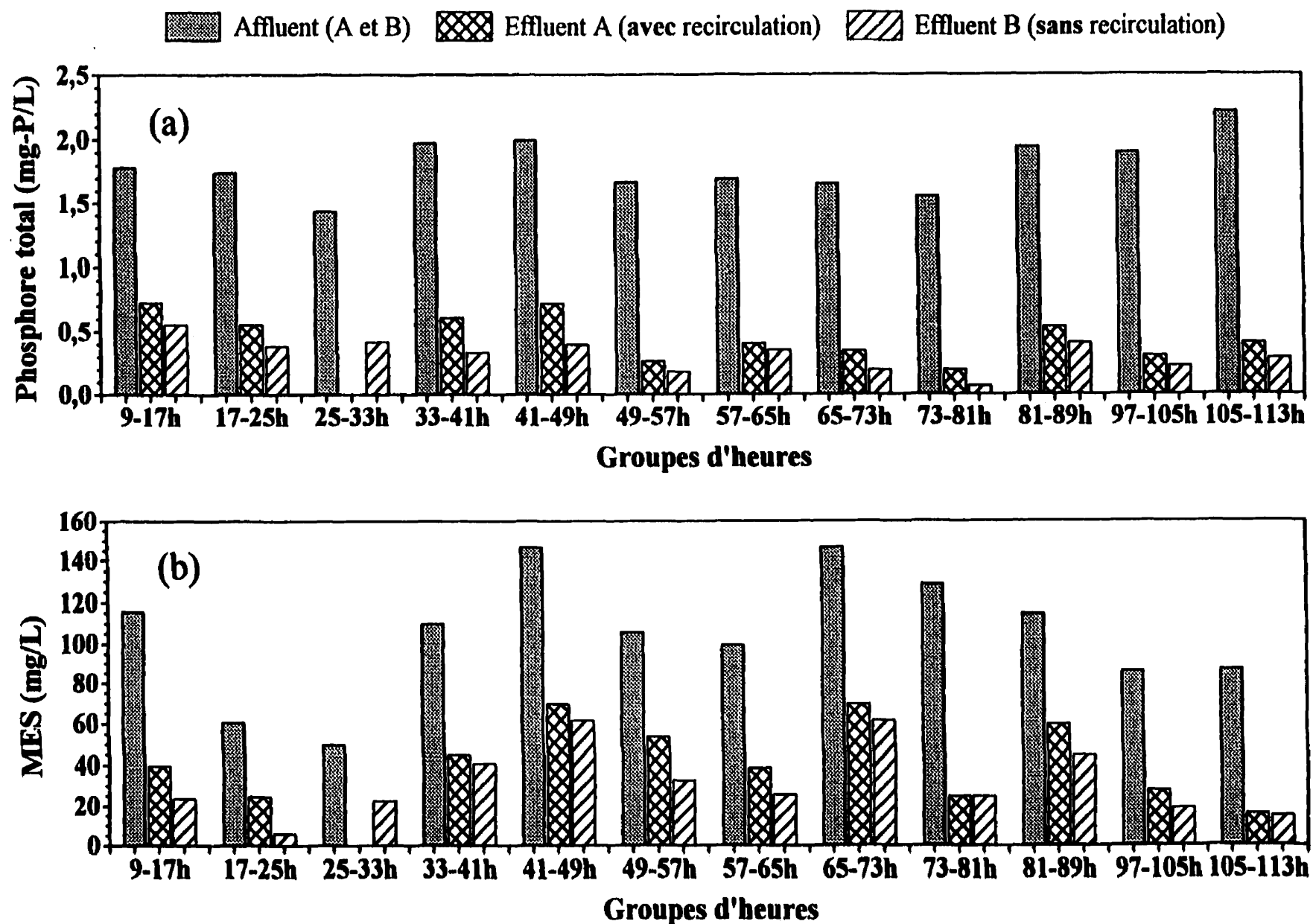


Fig. 3. Résultats (a) de turbidité instantanée à l'effluent, (b) de MES instantanées au flocculateur, (c) de concentrations de coagulant (alun) et (d) d'adjuvant de floculation (*PAM 703*) lors de la séquence d'essais I au Centre d'épuration Rive-Sud; démarrage de la recirculation à 00h.

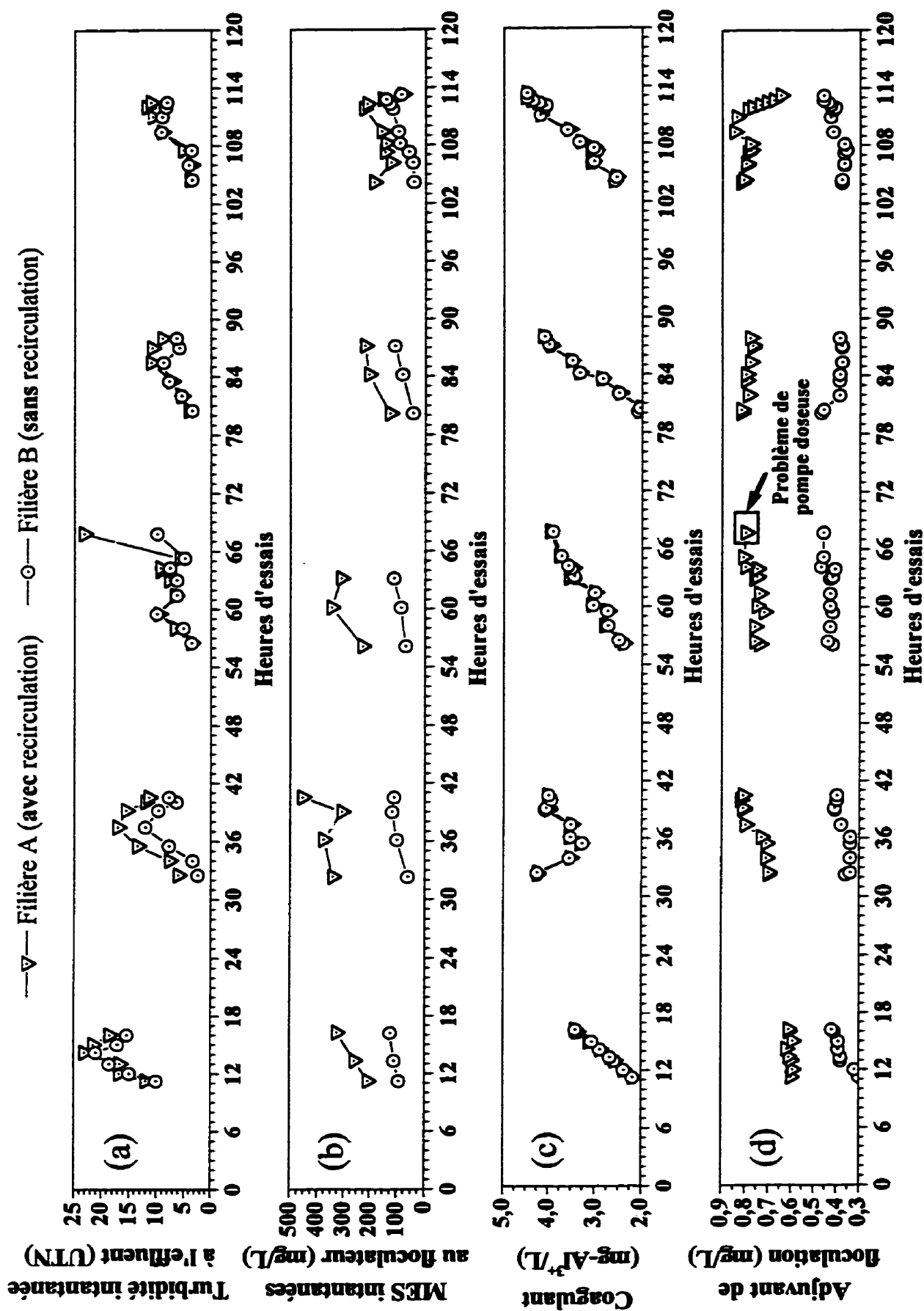


Fig. 4. Résultats (a) de phosphore total et (b) de MES lors de la séquence d'essais II au Centre d'épuration Rive-Sud; échantillons composés; démarrage de la recirculation à 00h.

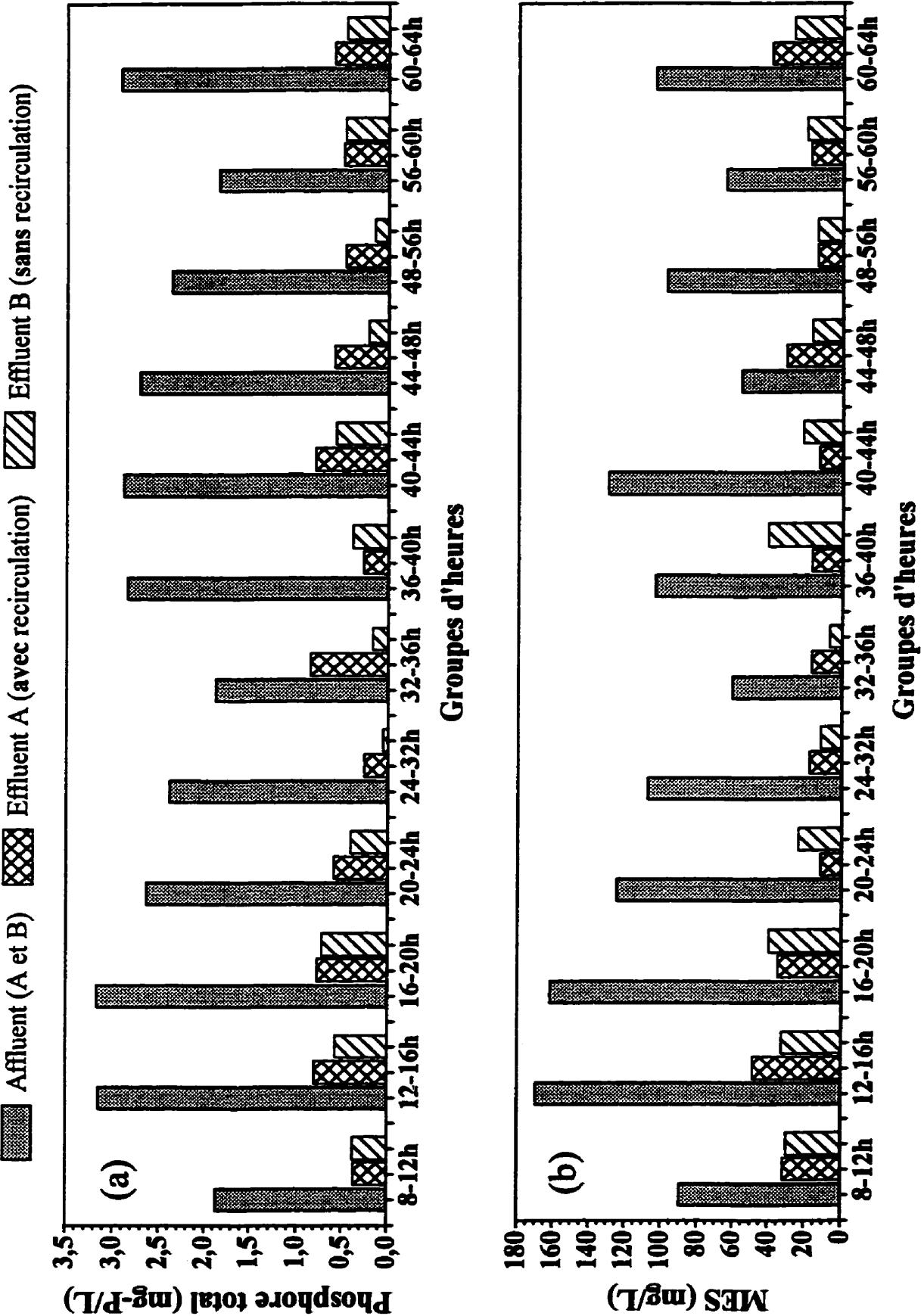


Fig. 5. Résultats (a) de turbidité instantanée à l'effluent, (b) de MES instantanées au flocculateur, (c) de concentrations de coagulant (alun) et (d) d'adjuvant de floculation (*PAM 703*) lors de la séquence d'essais II au Centre d'épuration Rive-Sud; démarrage de la recirculation à 00h.

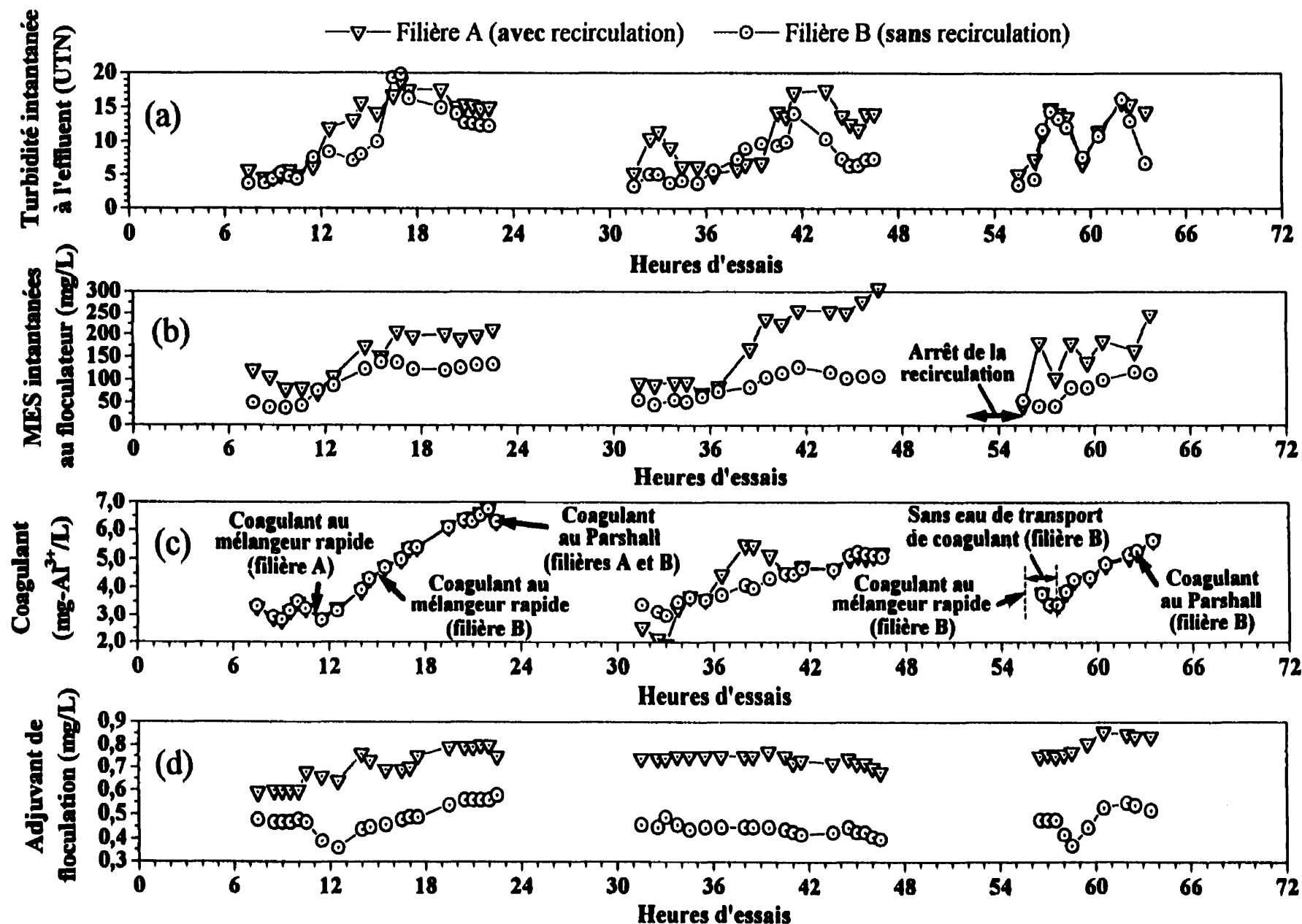


Fig. 6. Résultats des tests de temps de succion capillaire (TSC) :
 (a) séquence I, jour 1; (b) séquence II, jour 1.

Boues prélevées au *Centre d'épuration Rive-Sud*.

Conditionneur : *Prosédim CS-243*.

N.B. : MS = matières sèches de la boue.

—◇— Boues filière A (avec recirculation)

—○— Boues filière B (sans recirculation)

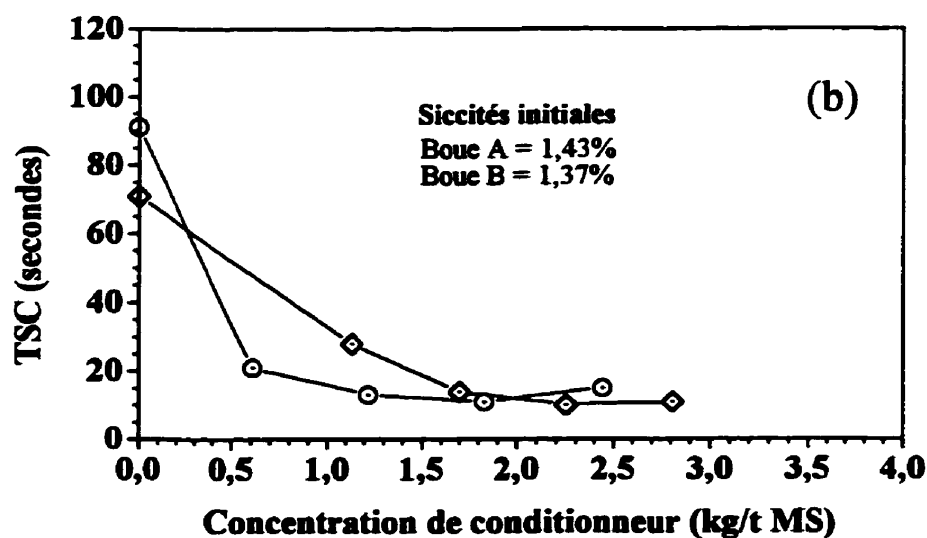
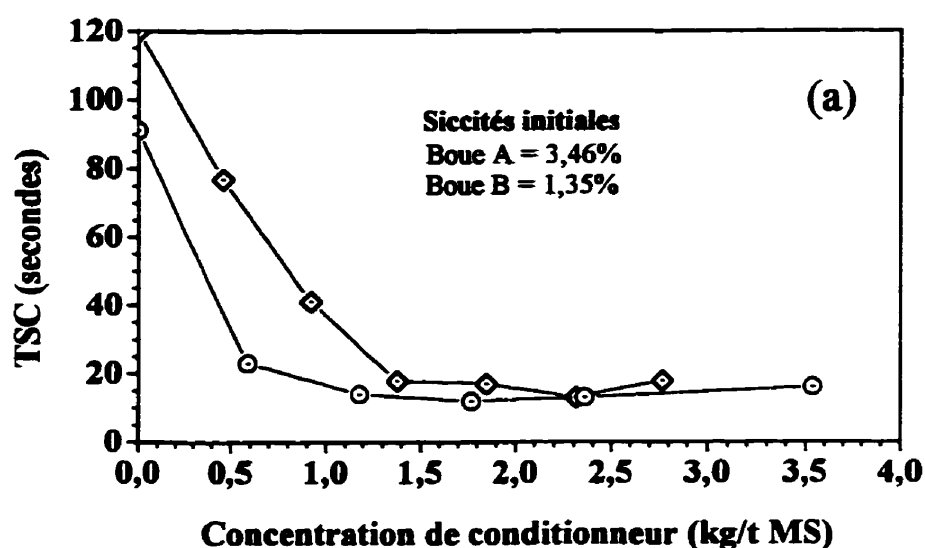


Fig. 7. Tests de décantation des boues - vitesses de chute de l'interface "eau-boue" : (a) prélèvement I; (b) prélèvement II.

Boues prélevées au *Centre d'épuration Rive-Sud*.

Tests de décantation réalisés en laboratoire (cylindre de 1 000 mL).

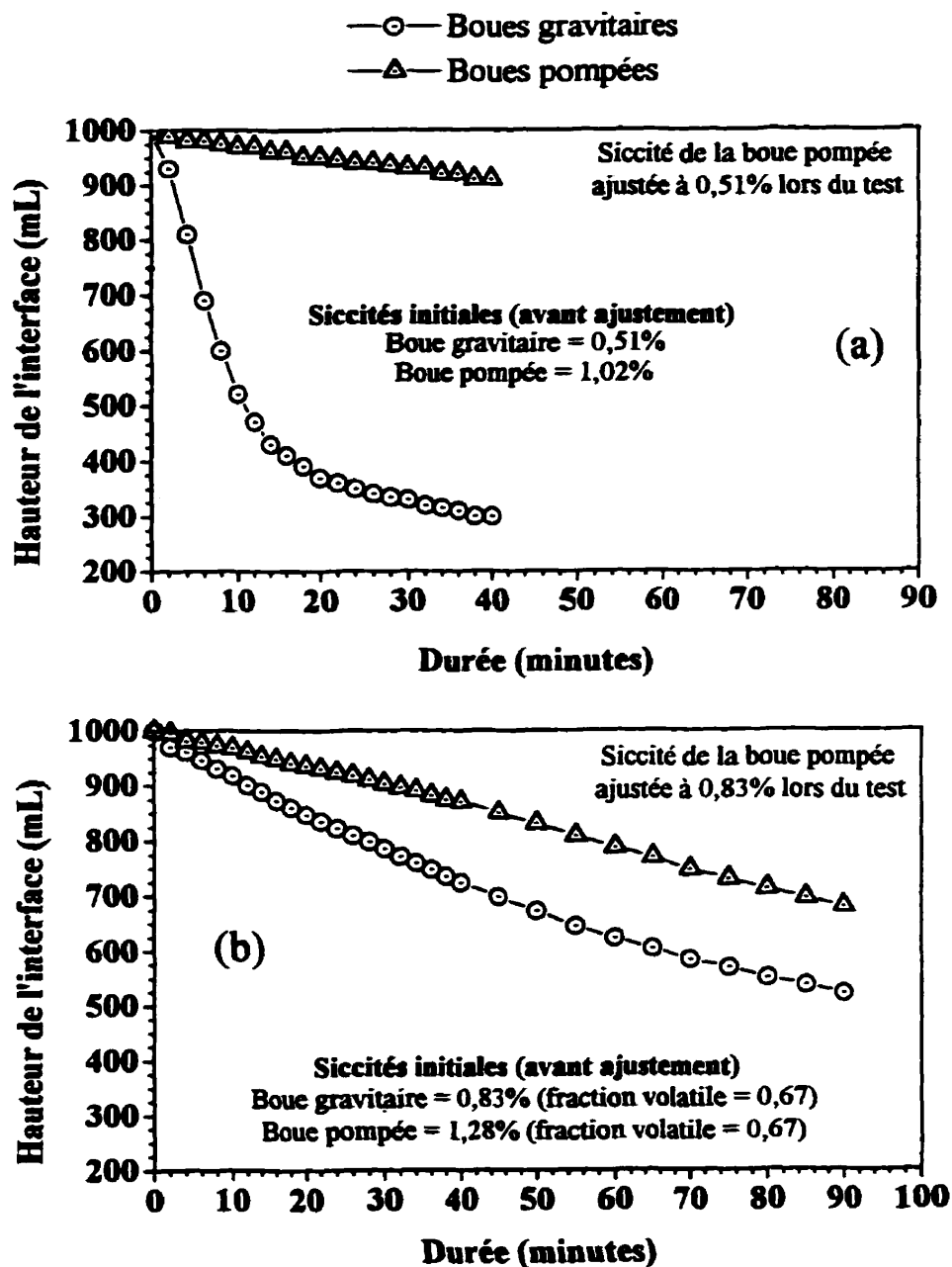


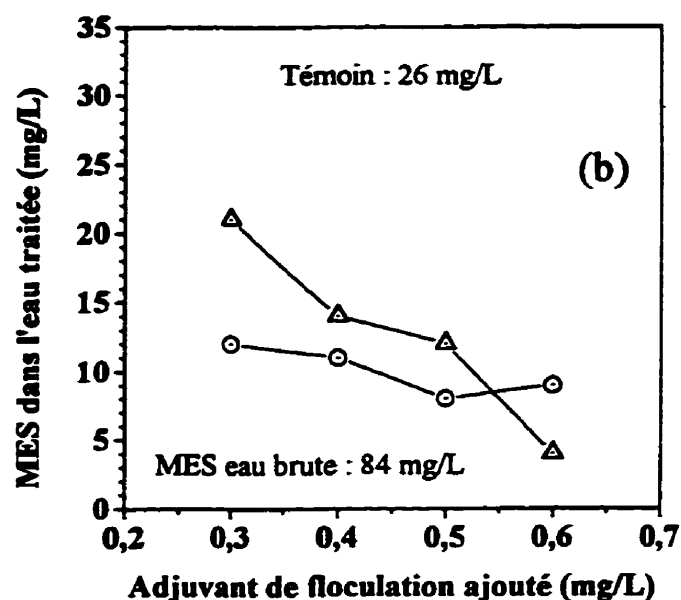
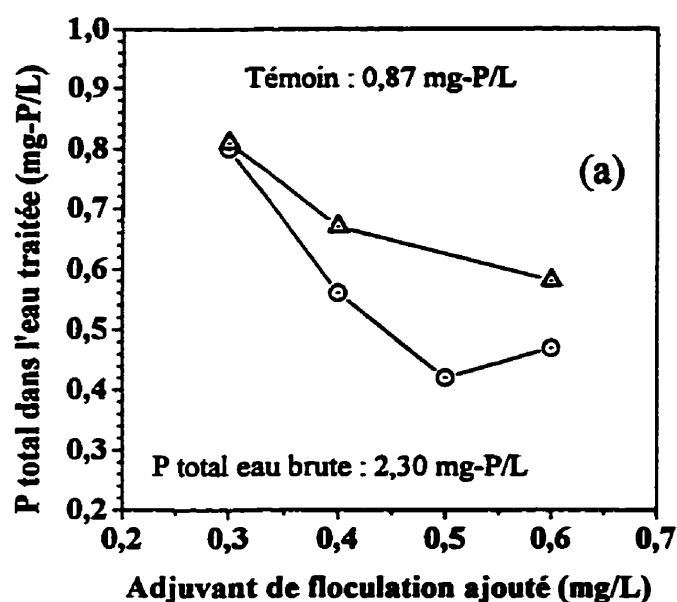
Fig. 8. Séries complémentaires I et II : effet de la pompe de recirculation sur l'abattement (a) du phosphore total et (b) des MES; effet du lieu d'ajout de la boue au procédé sur l'abattement (c) du phosphore total et (d) des MES.

Boues = 200 mg-MES/L; coagulant (alun) = 2,0 mg- Al^{3+} /L; adjuvant de floculation = *Percol 902*.

Essais témoins : coagulant = 2,0 mg- Al^{3+} /L; adjuvant de floculation (*Percol 902*) = 0,4 mg/L.

Essais en laboratoire (béchers); pH et alcalinité de l'eau brute = 7,4 et 200 mg- CaCO_3 /L.

—○— Boues gravitaires —△— Boues pompées
Procédure n° 1 (boue avant coagulant).



—○— Procédure n° 1 (boues avant coagulant) —◇— Procédure n° 2 (boues après coagulant)
Boues gravitaires.

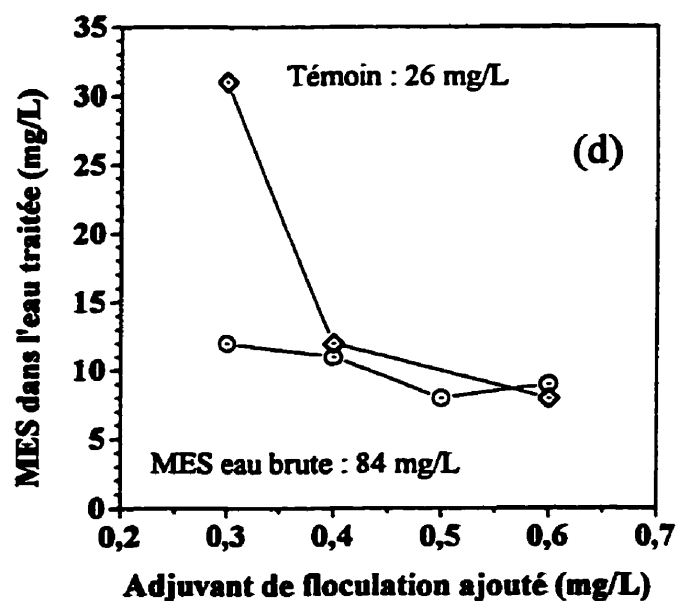
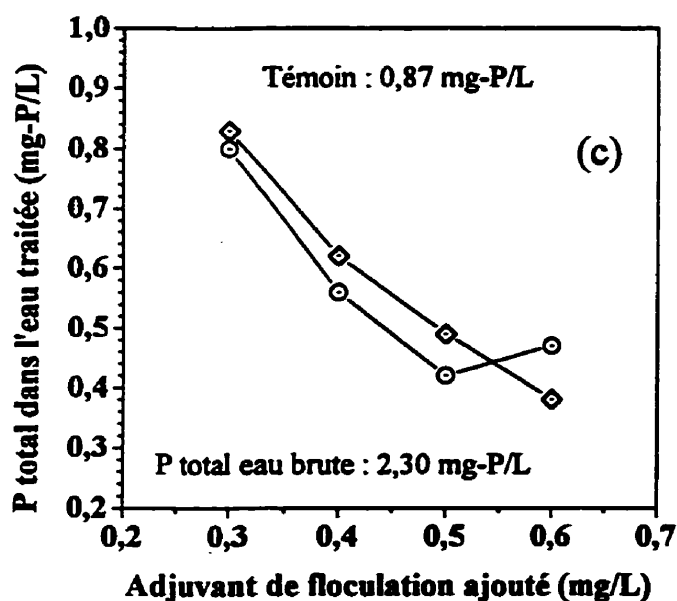


Fig. 9. Croquis du flocculateur/décanteur et cheminement des flocs.

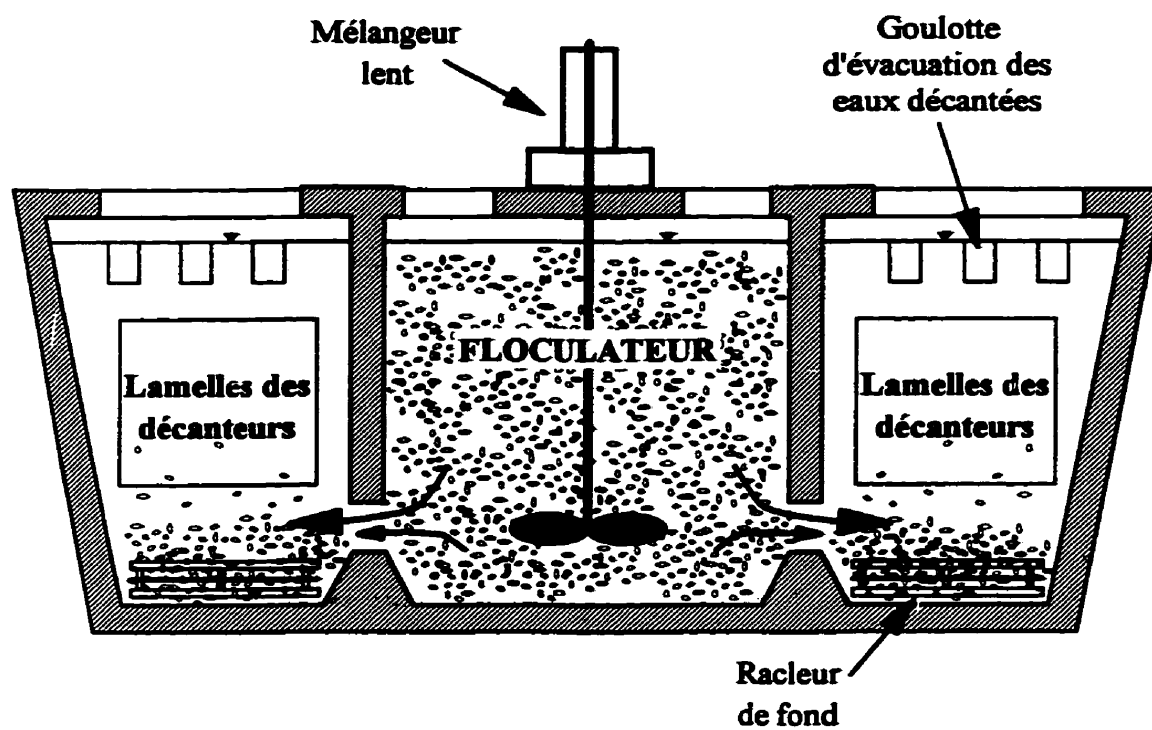


Fig. 10. Relation entre la turbidité et les MES aux flocculateurs A et B du *Centre d'épuration Rive-Sud*.

